Electronique Analogique I

Dr. ZIANE Med Issam ESGEE-Oran Année Universitaire : 2025 - 2026

Programme - Semestre 1 -

Chapitre 01. Les Semiconducteurs

Chapitre 02. Theorèmes en Electronique

Chapitre 03. Diodes à jonction

Chapitre 04. Transistor Bipolaire

Chapitre 05. Transistor à Effet de Champ

Chapitre 06. Amplificateur linéaire basses fréquences

CHAPITRE 01

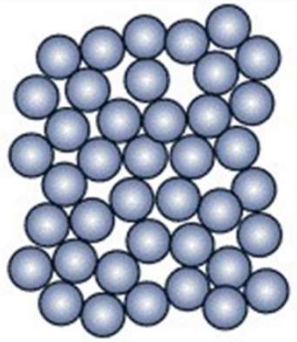
Les Semiconducteurs

Structure Cristalline

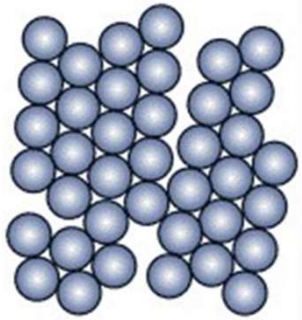
- Les matériaux solides se classent en deux grandes catégories, les matériaux amorphes et les matériaux cristallins

- **Amorphe:** les particules sont arrangés complètement d'une façon aléatoire: l'ordre d'arrangement n'est pas répété.
  - **Exemple:** Verres

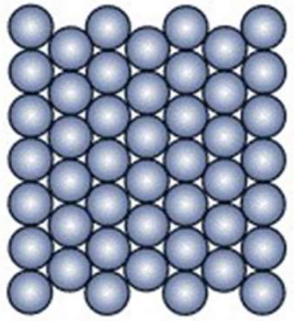
- **Cristal:** les particules dans le système doivent être arrangés périodiquement: la maille élémentaire se répéte régulièrement
  - **Exemple:** Quartz



Amorphe



Multicristallin



Cristallin

Structure Cristalline-note

- Un atome est constitué d'un **noyau**, qui contient des **protons (chargés +)** et des **neutrons (non chargés)**, autour duquel gravitent des **électrons (chargés –)**.

  Chaque atome possède un nom et un symbole, répertoriés dans la classification périodique des éléments (ou tableau de Mendeleïev)

- Un atome ou un groupement d'atomes a tendance à perdre ou gagner des électrons pour adopter la configuration la plus adaptée.

  -- Un atome qui a gagné un ou plusieurs électrons sur sa couche externe est un **ion chargé négativement**, appelé **anion**. Charge totale=(+protons)+(−électrons)

  -- Un atome qui a perdu un ou plusieurs électrons est un **ion chargé positivement** appelé **cation**.

- Une **molécule** est l'association de plusieurs atomes avec une **formule** qui renseigne sur la composition atomique d'une molécule: elle permet de savoir de quels atomes la molécule est constituée et en quelle quantité.

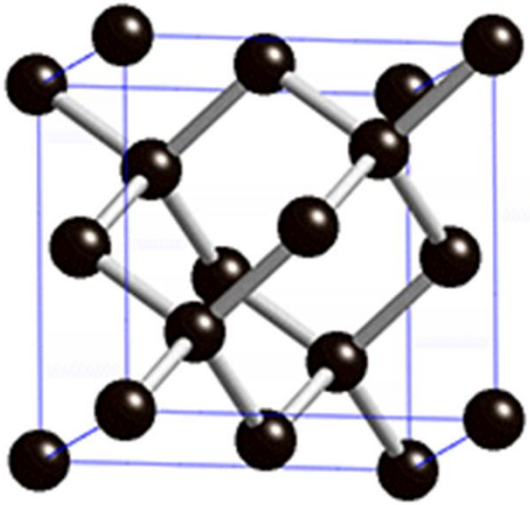
Structure Cristalline – types de cristaux

Il existe 4 familles de solides cristallisés

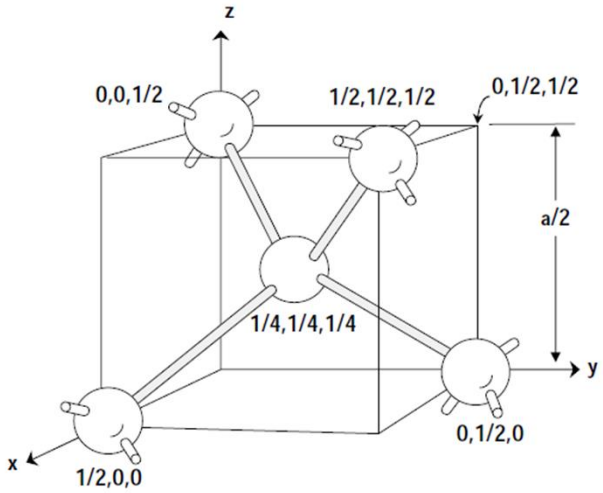
- les cristaux ioniques - les cristaux covalents - les métaux - les cristaux moléculaires.

Type	Nature des particules liées	Type de liaison	Exemple	Propriétés principales
Cristaux ioniques	Ions positifs et négatifs	Liaisons ioniques (forces électrostatiques)	NaCl (sel de table)	Solides durs, points de fusion élevés, cassants, conducteurs seulement fondus ou dissous
Cristaux covalents (atomiques)	Atomes non-métalliques	Liaisons covalentes (partage d'électrons)	Diamant, Quartz (SiO_2)	Très durs, points de fusion très élevés, souvent isolants
Cristaux métalliques	Atomes métalliques	Liaisons métalliques (électrons délocalisés)	Cu, Fe, Al	Bons conducteurs de chaleur et électricité, malléables, ductiles
Cristaux moléculaires	Molécules neutres	Forces de Van der Waals ou liaisons hydrogène	Glace (H_2O solide), I_2	Solides mous, points de fusion bas, mauvais conducteurs

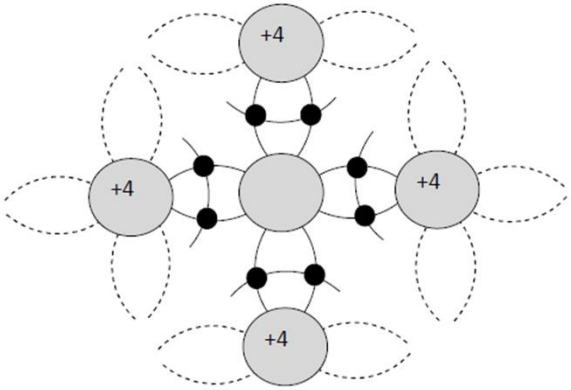
Structure Cristalline – Laison covalente



La structure de type diamant compte donc **8** atomes par maille



(a)

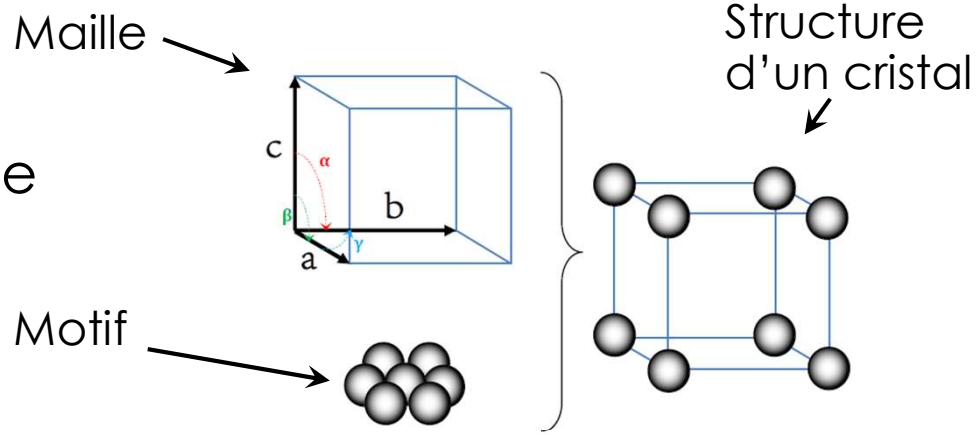


(b)

FIGURE 1.7 – Structure à liaison tétraédrique (a), représentation schématique en 2-D de l'association d'un atome de Carbone avec ses quatre voisins (b)

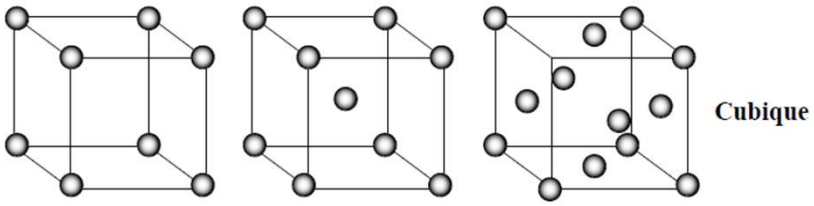
Système et réseau cristallin

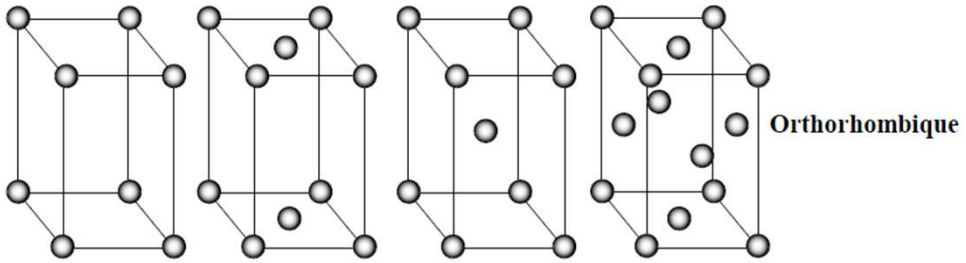
Maille + Motif = Structure cristalline



Les sept systèmes cristallin en 3 dimensions avec ces propriétés

Système	Nombre et symbole de mailles	Les paramètres de maille a, b et c	Les angles α, β et γ
Cubique	$3 \Rightarrow$ P, I, F	a=b=c	$\alpha = \beta = \gamma = 90°$
Tétragonal	$2 \Rightarrow$ P, I	a=b≠c	$\alpha = \beta = \gamma = 90°$
Orthorhombique	$4 \Rightarrow$ P, C, I, F	a≠b≠c	$\alpha = \beta = \gamma = 90°$
Hexagonal	$1 \Rightarrow$ P	a=b≠c	$\alpha = \beta = 90°$, $\gamma = 120°$
Monoclinique	$2 \Rightarrow$ P, C	a≠b≠c	$\alpha = \beta = 90° \neq \gamma$
Trigonal	$1 \Rightarrow$ P	a=b=c	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90°$
Triclique	$1 \Rightarrow$ P	a≠b≠c	$\alpha \neq \beta \neq \gamma$

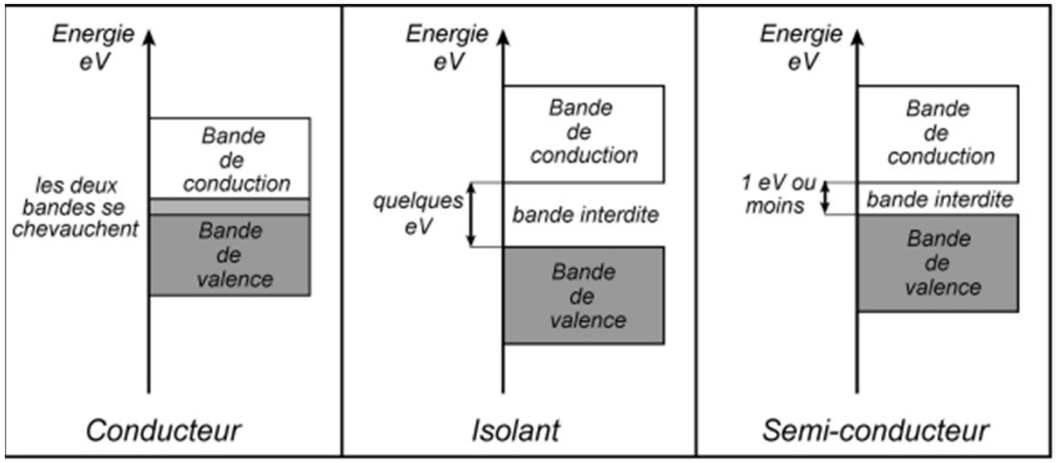


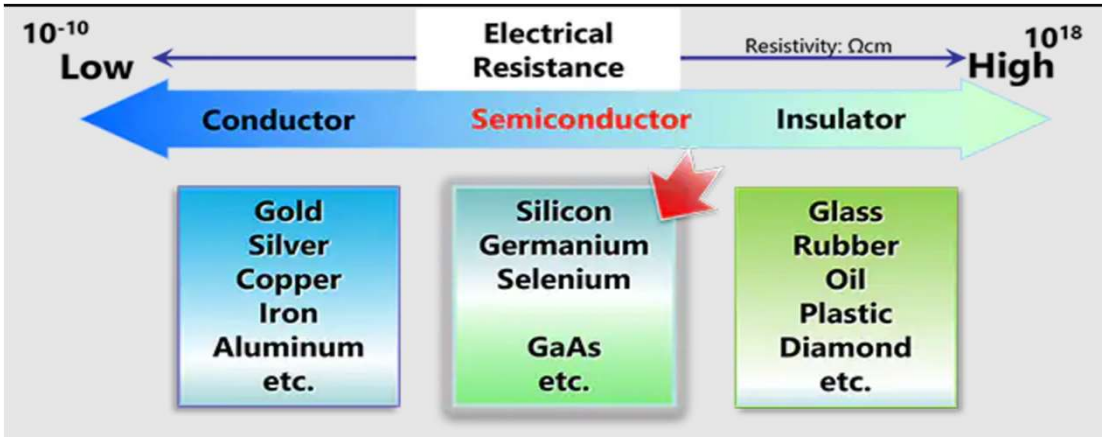


Bandes électroniques

- Les électrons de valence occupent la bande de valence.
- Au-dessus, on a la bande de conduction, séparée par un gap (bande interdite).
- Selon le remplissage, on distingue métaux, semi-conducteurs et isolants.

Type	Électrons de valence	Bande interdite (gap)	Exemple	Conductivité
Métal	1–3	Bande partiellement remplie / chevauchement	Na, Al, Cu	Très bonne
Semi-conducteur	4	Gap étroit (0,5–3 eV)	Si, Ge, GaAs	Moyenne (dépend T et dopage)
Isolant	5–8	Gap large (> 4 eV)	Diamant, NaCl, SiO_2	Très faible





Semiconducteur

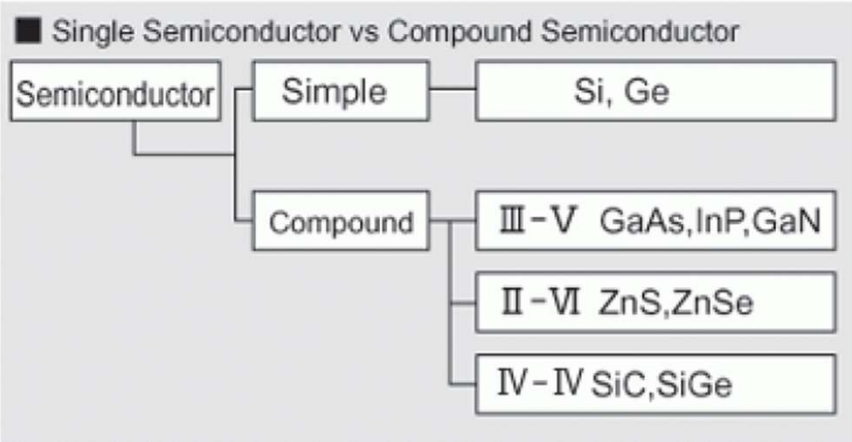
- Métal : conduit très bien l'électricité (électrons libres nombreux).
- Isolant : ne conduit pas (pas d'électrons libres).
- Semiconducteur : conduit un peu, mais sa conductivité peut être contrôlée.

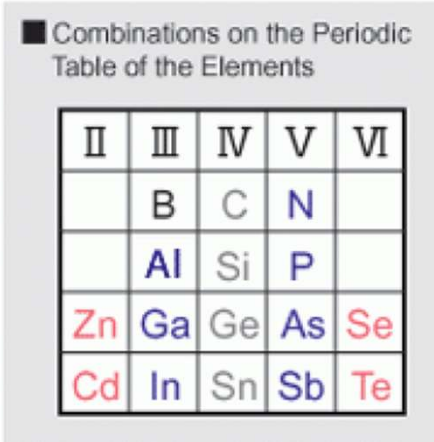
Sensibles à :

- La **température** (plus chaud → plus de porteurs de charge).
- La **lumière** (photons excitent des électrons → photoconductivité).
- Le **dopage** (ajout d'impuretés donne plus d'électrons ou de trous).

SC Intrinsèque: est un semiconducteur dépourvu de toute impureté susceptible de modifier la densité de porteurs.

SC Extrinsèque: On modifie considérablement les propriétés électriques d'un semiconducteur en le dopant de manière contrôlée avec des atomes spécifiques





A NOTER

- **Composition** = Décrit quels éléments chimiques forment un matériau et dans quelles proportions.

  Si → composé d'un seul élément.

  GaAs → composé de 50 % gallium (Ga) et 50 % arsenic (As).

- **Alliage** = Mélange contrôlé de matériaux, proportion ajustable → propriétés réglables → recette modulable

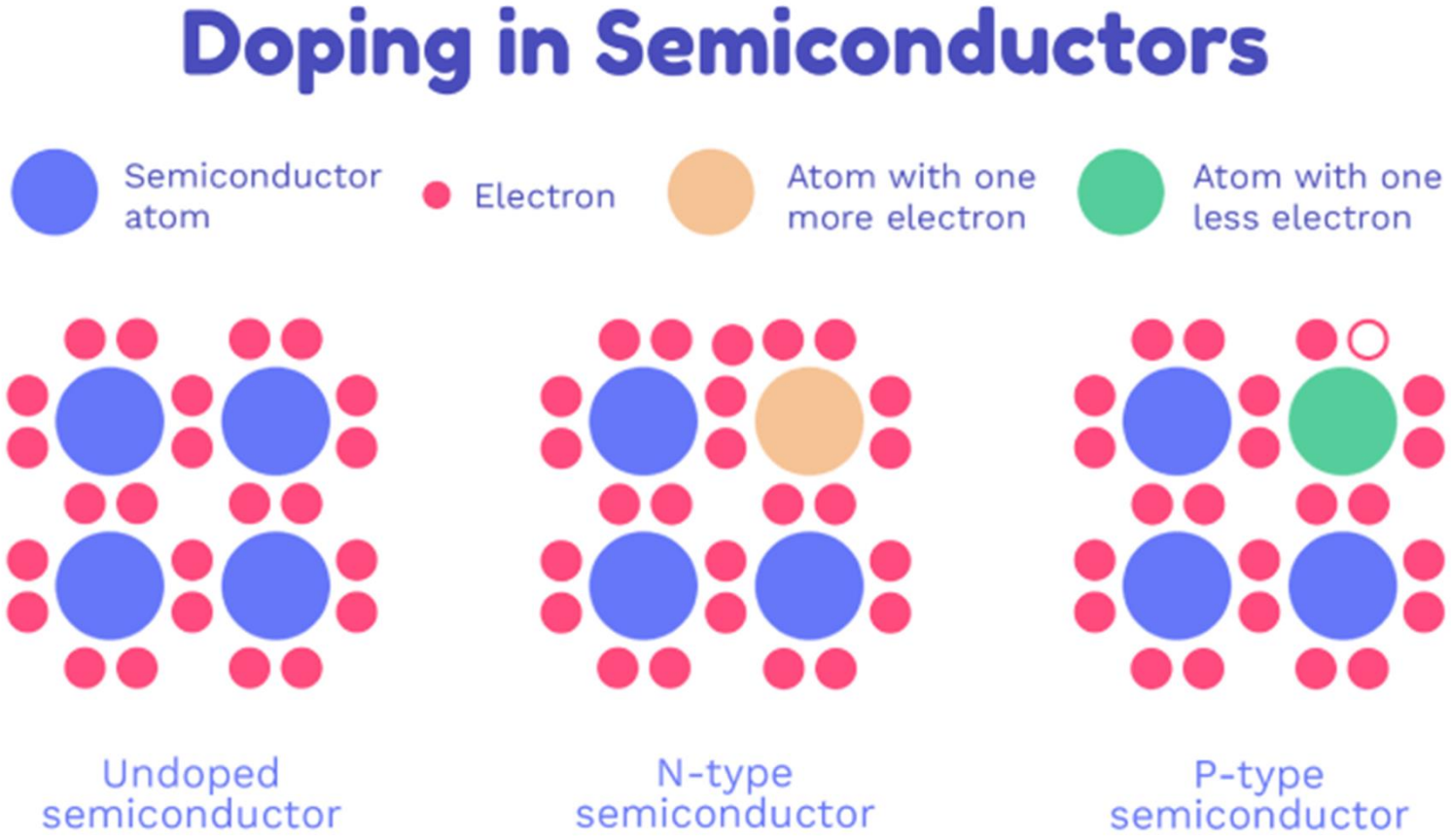
  $Al_xGa_{1-x}As$ → un alliage ou x varie entre 0 et 1.

- **Dopage** = Ajouter une très petite quantité d'impuretés (dopants) dans un semi-conducteur pur ou composé, sans changer sa structure globale.

  Si (4 électrons de valence) :Dopage avec P ou avec B

  → Pour contrôler la conductivité (n ou p)

SC type N et P

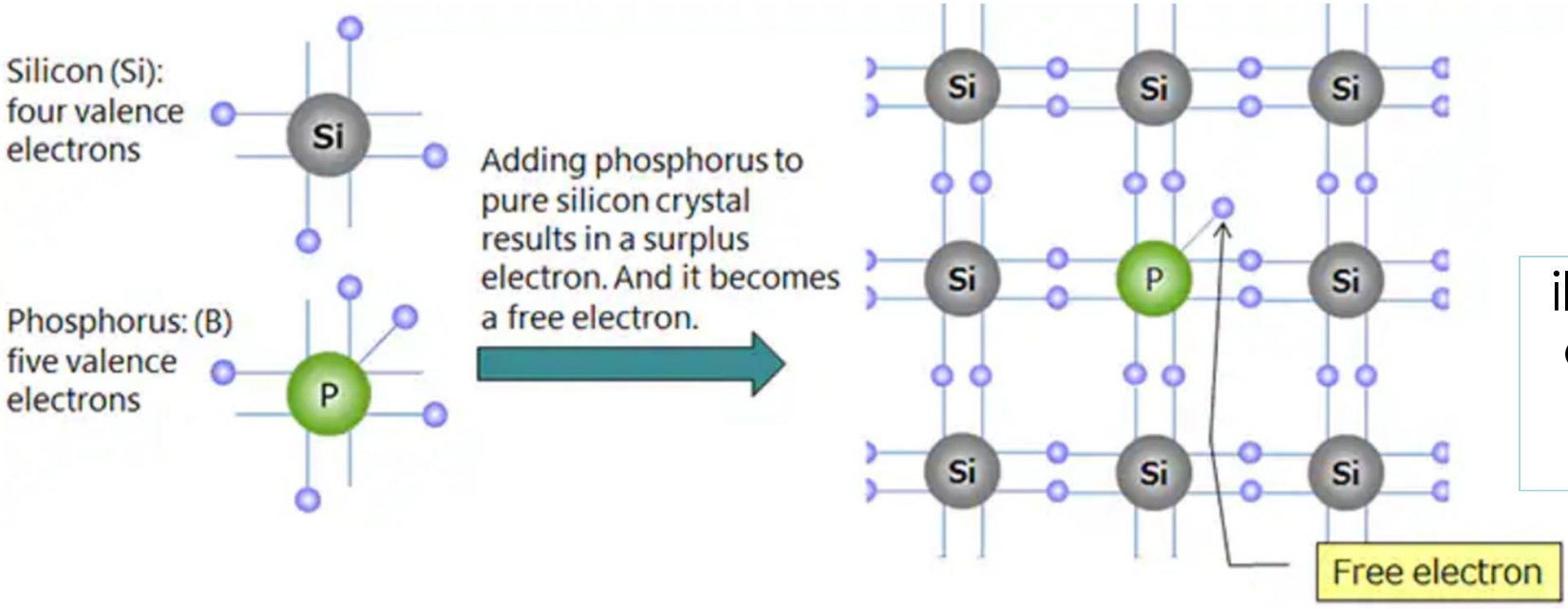

Doping in Semiconductors
Semiconductor atom
Electron
Atom with one more electron
Atom with one less electron
Undoped semiconductor
N-type semiconductor
P-type semiconductor

Semiconducteur de type N

- Impuretés de type donneur → n > p → type n

Considérons le cas du SC Silicium (colonne IV du tableau périodique)

- Introduisons des atomes dopants de la colonne V:
- Par ex: N, As ou P → 5 électrons périphériques (**pentavalents**)→ 1 électron de plus au **Si**.



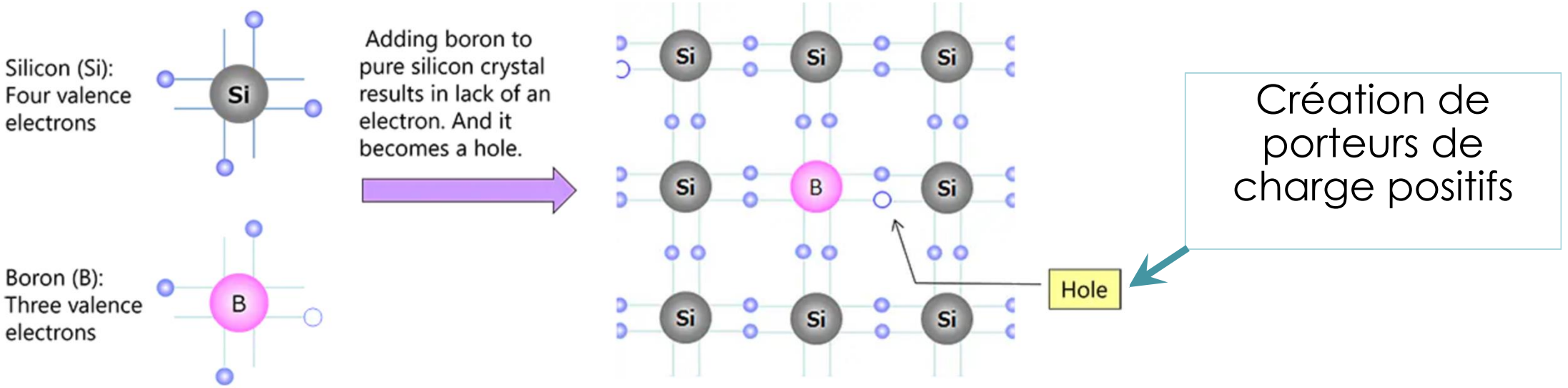
il peut se propager dans tout le cristal → il participe à la conduction

Semiconducteur de type P

- Impuretés de type donneur → p > n → type p

Considérons le cas du SC Silicium (colonne IV du tableau périodique)

- Introduisons des atomes dopants de la colonne III:
- Par ex: B, In → 3 électrons périphériques (**trivalents**)→ absence de 1 e- au **Si** → + 1 trous



Dopage: Ordres de grandeur

“

Le **dopage** est exprimé en concentration **d'atomes dopants par cm³**.

- **Semi-conducteur intrinsèque (pur, non dopé)**

  Si à 300 K → ni est d'environ 1,5 × 10^{10} paires électron–trou / cm³ seulement.

- **Semi-conducteur faiblement dopé**

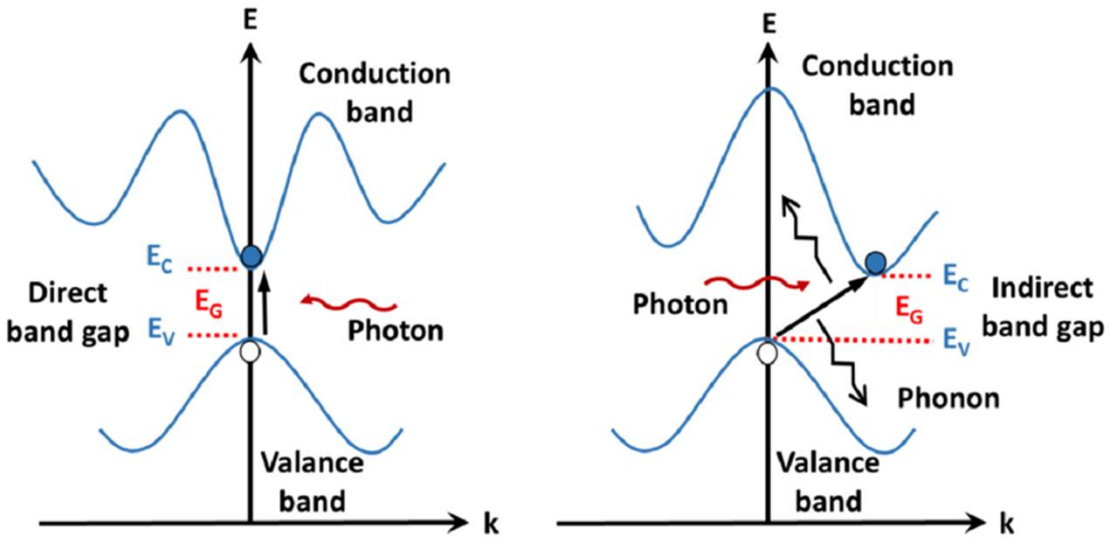
  Dopage : 10^{13}–10^{15} atomes/cm³ → La conduction reste faible, mais contrôlable.

- **Semi-conducteur modérément dopé**

  Dopage : 10^{15}–10^{17} atomes/cm³ → Conduction notable → utilisé dans la plupart des dispositifs électroniques.

- **Semi-conducteur fortement dopé**

  Dopage : 10^{18}–10^{20} atomes/cm³ → Le matériau se comporte presque comme un métal → utilisé pour faire des contacts ohmiques.



SC à gap direct et indirect

Dispositifs électronique et optoélectronique désirés	Structure de bandes liées à ces dispositifs
Dispositifs électroniques de haute puissance	Gap énergie important (GaN, SiC, C)
Dispositifs micro-onde	Gap d'énergie moyen (InAs, InGaAs)
Emetteurs de lumière	Matériaux à gap d'énergie direct
Diodes laser (émission à 1.55-1.3 µm)	Gap d'énergie de ~ 0.8 - 1 eV (GaInAsN, GaInAsP)
Applications d'affichages (rouge, vert, bleu)	Gap d'énergie de ~ 1.6 – 3.6 eV
Emetteurs à faible longueur d'ondes.	Gap d'énergie élevé (GaN, AlN)

TABLE – Le gap d'énergie pour quelques matériaux semico

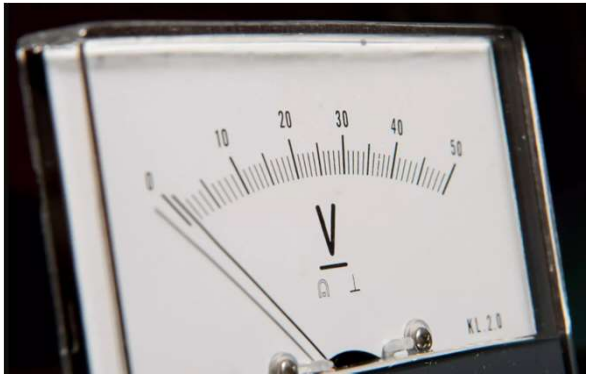
Semiconducteur	Le gap d'énergie (eV)	La nature du gap
Si	1.17	Indirect
GaAs	1.519	Direct
GaP	2.35	Indirect
InP	1.424	Direct
CdSe	1.84	Direct
CdTe	1.61	Direct
ZnS	3.91	Direct
CdO	3.44	Direct

CHAPITRE 02

Lois des circuits et théorèmes

❑ Tension (Volt)

Dans un circuit électrique, la tension est comme une force qui pousse les charges électriques à se déplacer.



Par une simple analogie, vous pouvez considérer la tension comme une différence de pression créée par une pompe qui fait circuler l'eau à travers un tuyau dans un système d'eau fermé.

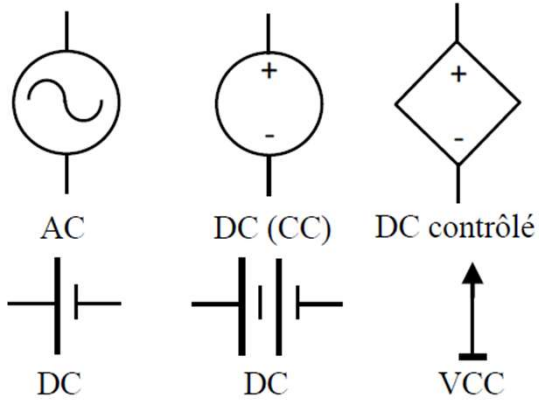
FIGURE 1.1: Différence de potentiel (différence de tension).

Tension continue (DC)

Constante dans le temps et ne change pas de polarité

Tension alternative (AC).

Varie constamment dans le temps et change de polarité

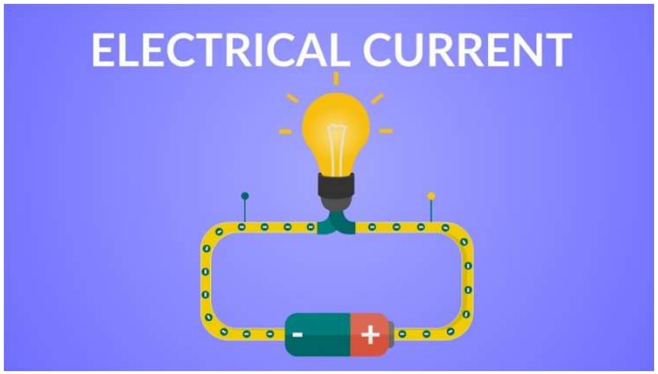


Symboles les plus couramment utilisés pour les sources de tension.

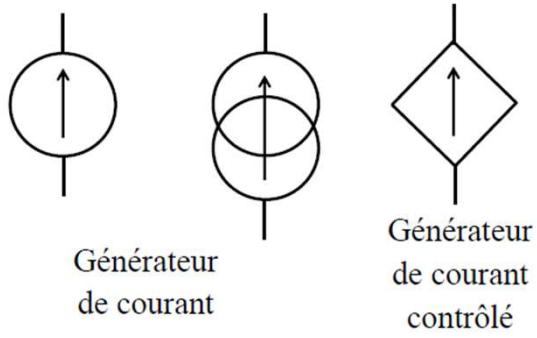
André-Marie Ampère (1775–1836), physicien et mathématicien français

❑ Courant (Ampère)

Dans un circuit électrique, le courant électrique mesure le flux de charges électriques qui circulent dans un circuit



Par une simple analogie, vous pouvez considérer le courant comme un débit de l'eau, c'est-à-dire la quantité de l'eau qui passe en un temps donné (temps d'écoulement).



Symboles les plus couramment utilisés pour les sources de courant.

Courant continue (DC)

Un flux stable qui va dans une seule direction.

Courant alternative (AC).

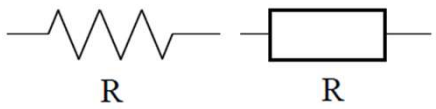
Un flux qui change de direction périodiquement.

Michael Faraday (1791–1867), physicien et chimiste anglais

Joseph Henry (1797-1878), scientifique et physicien américain

❑ Résistance (Ohm)

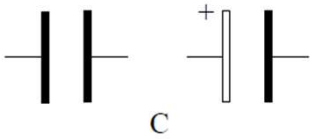
C'est un composant qui freine le passage du courant électrique



Par une simple analogie, vous pouvez penser à une résistance comme une vanne partiellement ouverte dans un système d'eau fermé et qui limite la quantité d'eau s'écoulant dans un tuyau.

❑ Capacité (Farad)

C'est un composant qui stocke l'électricité sous forme de charges puis la restitue



Par une simple analogie, vous pouvez penser à une capacité comme un réservoir souple relié au tuyau : il se remplit quand la pression augmente et se vide quand la pression baisse.

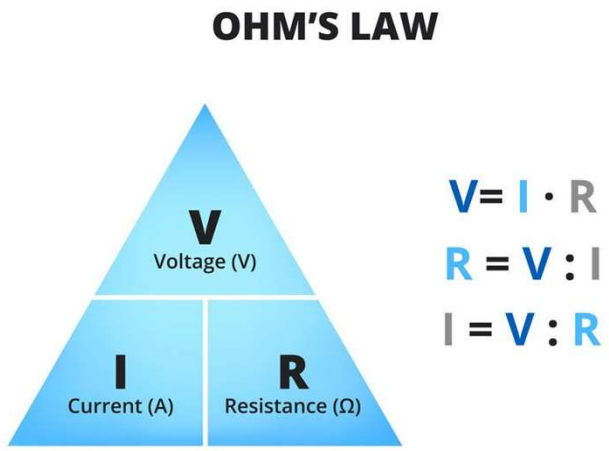
❑ Inductance (Henry)

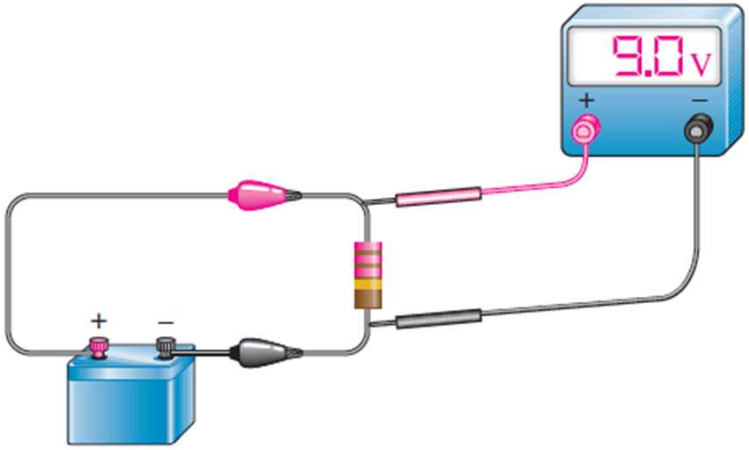
C'est un composant qui peut emmagasiner de l'énergie sous forme de champ magnétique

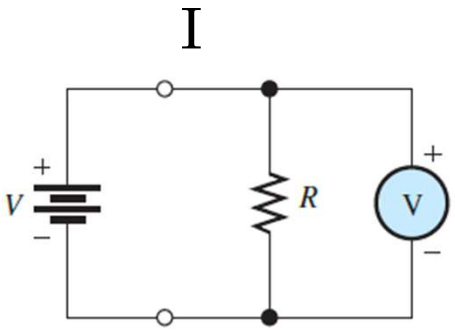
Comme une roue à aubes lourde placée dans le tuyau, elle résiste au changement brusque du débit (elle met du temps à accélérer ou ralentir), mais une fois lancée, elle continue à maintenir le flux d'eau.

❑ Lois d'Ohm

La relation fondamentale qui lie la tension (U), le courant (I) et la résistance (R) dans un circuit électrique.







V = R . I

❑ Lois de Kirchhoff

❑Loi des nœud

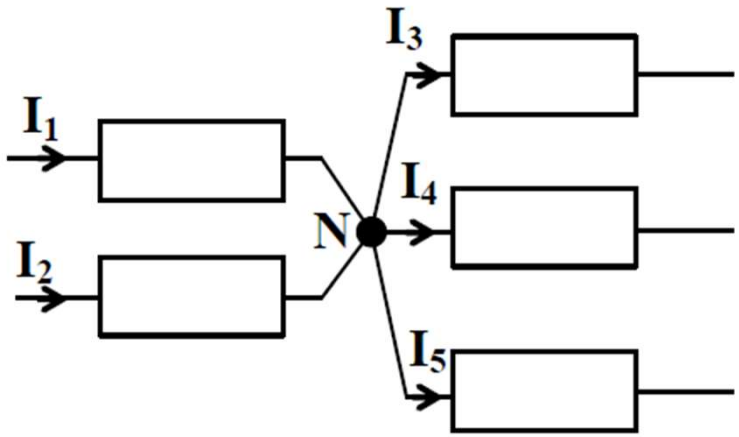
La somme algébrique des courants entrant dans un nœud est égale à la somme des courants en sortant.

Cette loi est valable à condition d'adopter une convention de signe cohérente, telle

que :

- les courants entrants dans le nœud sont considérés comme positifs,
- et les courants sortants comme négatifs, ou inversement.

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5$$



$$\sum_{n=1}^{N} I_n = 0$$

❑ Lois de Kirchhoff

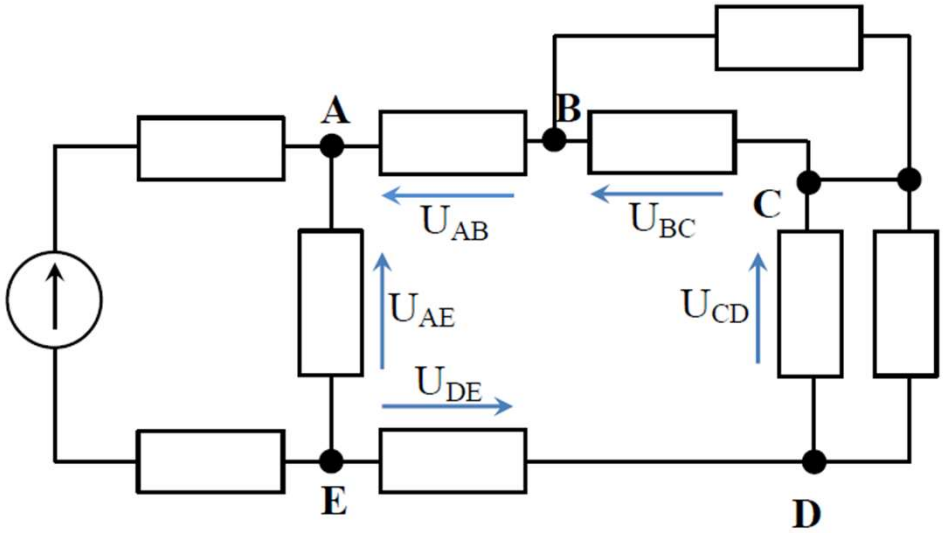
❑Loi des mailles

Dans une maille fermée, la somme des tensions prises dans le sens de parcours choisi est égale à la somme des tensions prises dans le sens opposé.

Considérons la maille ABCDEA. Dans ce cas particulier, l'application de la loi des mailles conduit à l'écriture de l'équation suivante :

$$U_{AB} + U_{BC} + U_{CD} + U_{DE} = U_{AE}$$

Où U_{AB} est la différence de potentiel entre les nœuds A et B.



$$\sum_{n=1}^{N} V_n = 0$$

❑ Diviseur de tension

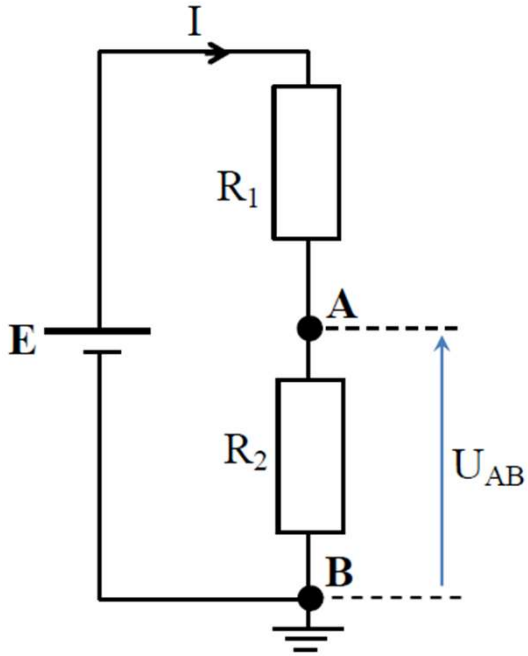
Un diviseur de tension est un montage avec deux résistances en série qui permet d'obtenir, à partir d'une tension d'entrée, une tension de sortie plus petite

L'intensité du courant qui traverse R_2,

$$E = R_1.I + R_2.I \Longrightarrow I = \frac{E}{R_1 + R_2}$$

La tension aux bornes de R_2 est donnée

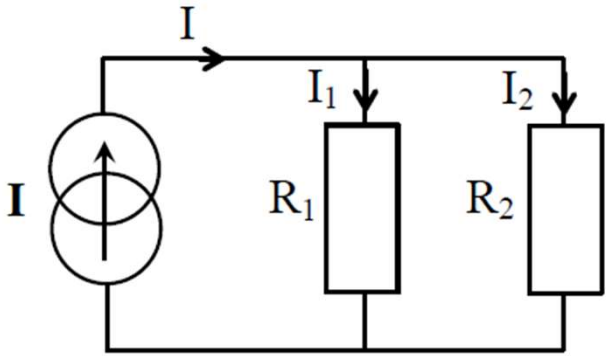
$$U_{AB} = E\frac{R_2}{R_1 + R_2}$$



❑ Diviseur de courant

Un diviseur de courant est un montage où plusieurs résistances sont en parallèle

➡ Le courant total se partage entre elles en fonction de leur valeur



La tension U est

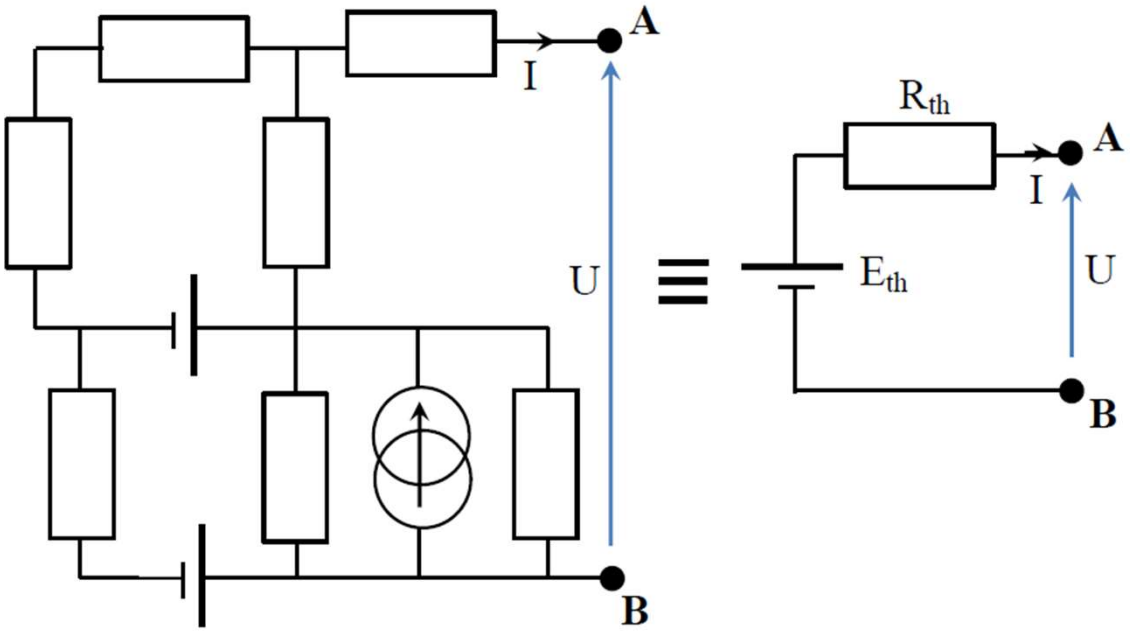
$$U = R_2.I_2 = I.(R_1 \parallel R_2) = I\frac{R_1.R_2}{R_1 + R_2}$$

Le courant I_2 aux bornes de R_2 est donnée

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = I\frac{R_1.R_2}{R_1 + R_2}.\frac{1}{R_2} = I\frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

❑ Théorème de Thévenin

Il permet de remplacer un circuit linéaire complexe à deux bornes par une source de tension unique (E_{TH}) en série avec une résistance (R_{TH}).



- La valeur E_{TH} est égale à la tension mesurée entre A et B à vide (charge déconnectée). $E_{TH\text{-circuit-ouvert}}$
- La résistance interne R_{TH} correspond à la valeur de résistance résultante entre les points A et B lorsque les sources sont désactivées (courtes circuitées).

ou toutes les sources remplacées par leurs résistances internes (qui pour une source de tension idéale est nulle).

❑ Théorème de Norton

Tout circuit électrique linéaire vu depuis deux bornes peut être remplacé par une source de courant idéale (I_N) en parallèle avec une résistance (R_N)

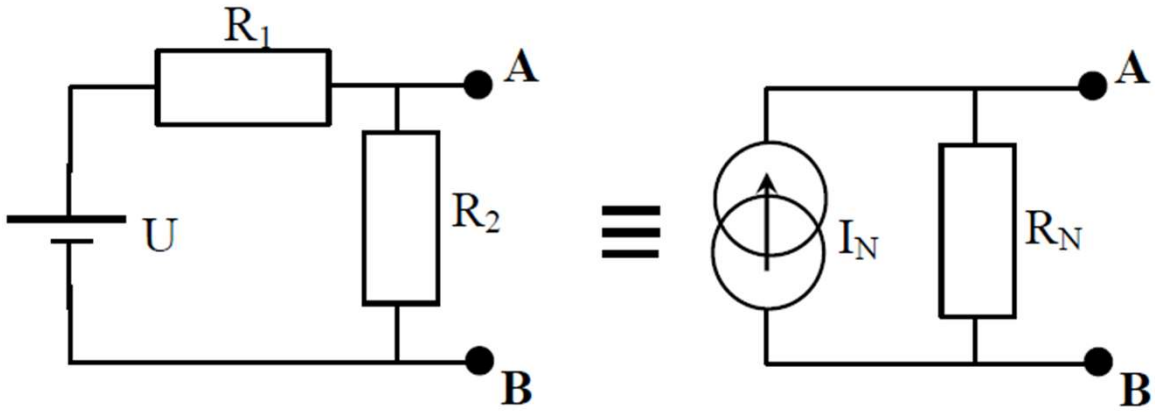
- Courant de Norton (I_N)

courant de court-circuit mesuré aux bornes du circuit (si on relie directement les deux bornes par un fil).

$I_{N\text{-Court-Circuit}}$

- Résistance de Norton (R_N)

On "éteint" toutes les sources (tensions → court-circuit, courants → circuit ouvert) et on calcule la résistance équivalente.



$$R_N = \frac{V_{circuit-ouvert}}{I_{court-circuit}}$$

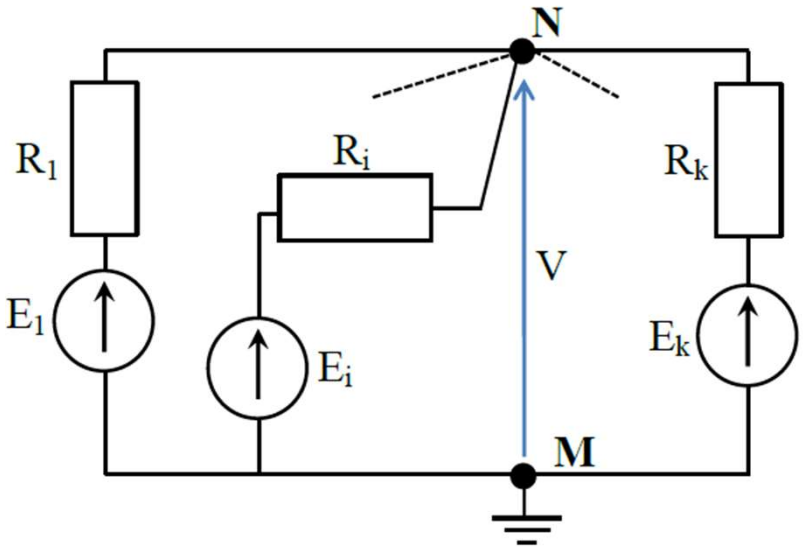
Jacob Millman (1911–1991), ingénieur et professeur américain, né en Russie

❑ Théorème de Millman

Permet de simplifier le calcul de la tension à un nœud où plusieurs sources de tension (avec leurs résistances internes) sont connectées en parallèle.

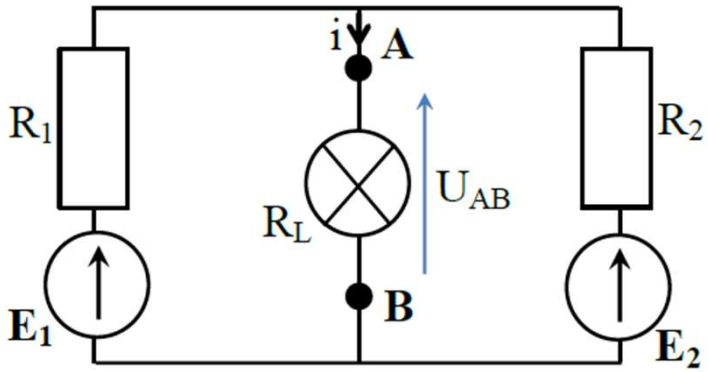
- Si on a n branches, chacune avec une source de tension Vi en série avec une résistance Ri, alors la tension au nœud N est :

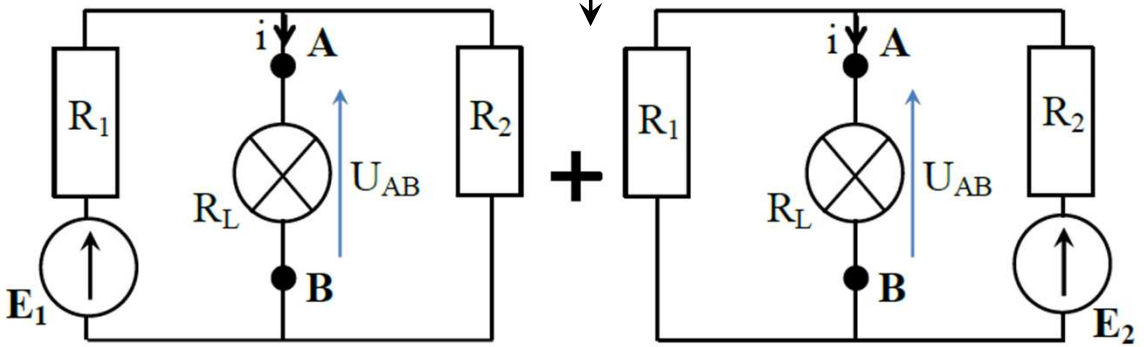
$$V = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{V_i}{R_i}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i}}$$



❑ Théorème de superposition

Dans un circuit linéaire, le courant (tension) dans une branche est déterminé par la somme algébrique des courants (tension) induits par chaque source indépendante prise individuellement, tandis que les autres sources indépendantes sont neutralisées.





- Une source de tension idéale → remplacée par un court-circuit (fil).
- Une source de courant idéale → remplacée par un circuit ouvert (coupure).

$$u = u_1 + u_2 = \frac{R_L.(R_2.e_1 + R_1.e_2)}{R_1.R_2 + R_L(R_1 + R_2)}$$

$$i = i_1 + i_2 = \frac{R_2.e_1 + R_1.e_2}{R_1.R_2 + R_L(R_1 + R_2)}$$

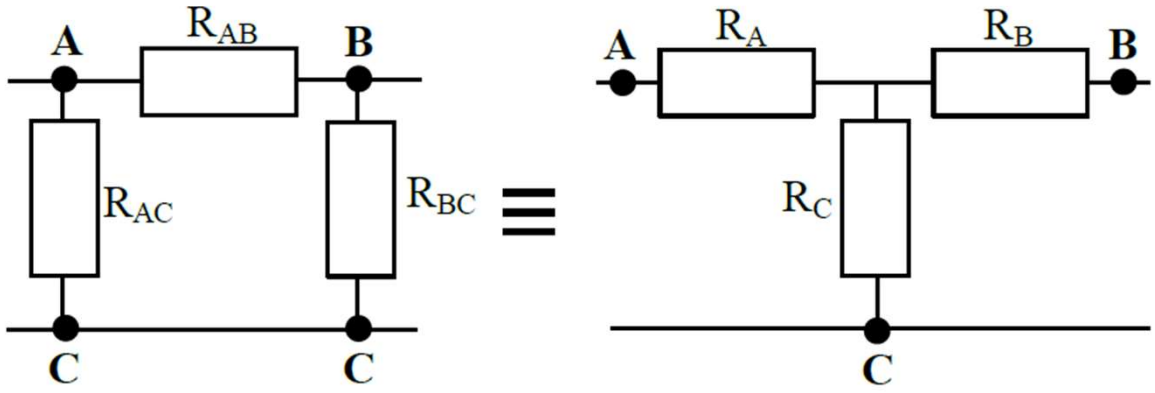
$$u_1 = \frac{R_2.R_L.e_1}{R_2.R_L + R_1(R_2 + R_L)} \qquad u_2 = \frac{R_1.R_L.e_2}{R_1.R_L + R_2(R_1 + R_L)}$$

$$i_1 = \frac{R_2.e_1}{R_2.R_L + R_1(R_2 + R_L)} \qquad i_2 = \frac{R_1.e_2}{R_1.R_L + R_2(R_1 + R_L)}$$

Arthur Edwin Kennelly (1861-1939) , Colaba, en Inde britannique

❑ Théorème de Kennelly

Permet de transformer un réseau de résistances montées en triangle (ou en π) en un réseau équivalent en étoile (Y), et inversement.



- Transformation Δ → Y

$$R_A = \frac{R_{AB}R_{AC}}{R_{AB}+R_{BC}+R_{AC}}, R_B = \frac{R_{AB}R_{BC}}{R_{AB}+R_{BC}+R_{AC}}, R_C = \frac{R_{AC}R_{BC}}{R_{AB}+R_{BC}+R_{AC}}$$

- Transformation Y → Δ

$$R_{AB} = \frac{R_A.R_B + R_A.R_C + R_B.R_C}{R_C}$$

$$R_{BC} = \frac{R_A.R_B + R_A.R_C + R_B.R_C}{R_A}$$

$$R_{AC} = \frac{R_A.R_B + R_A.R_C + R_B.R_C}{R_B}$$

❑ Théorème de Substitution

Dans un circuit électrique, si une branche est traversée par un certain courant et soumise à une certaine tension, alors on peut remplacer toute cette branche par n'importe quel autre élément (ou combinaison d'éléments) qui conserve exactement la même tension et le même courant, sans modifier le reste du circuit.

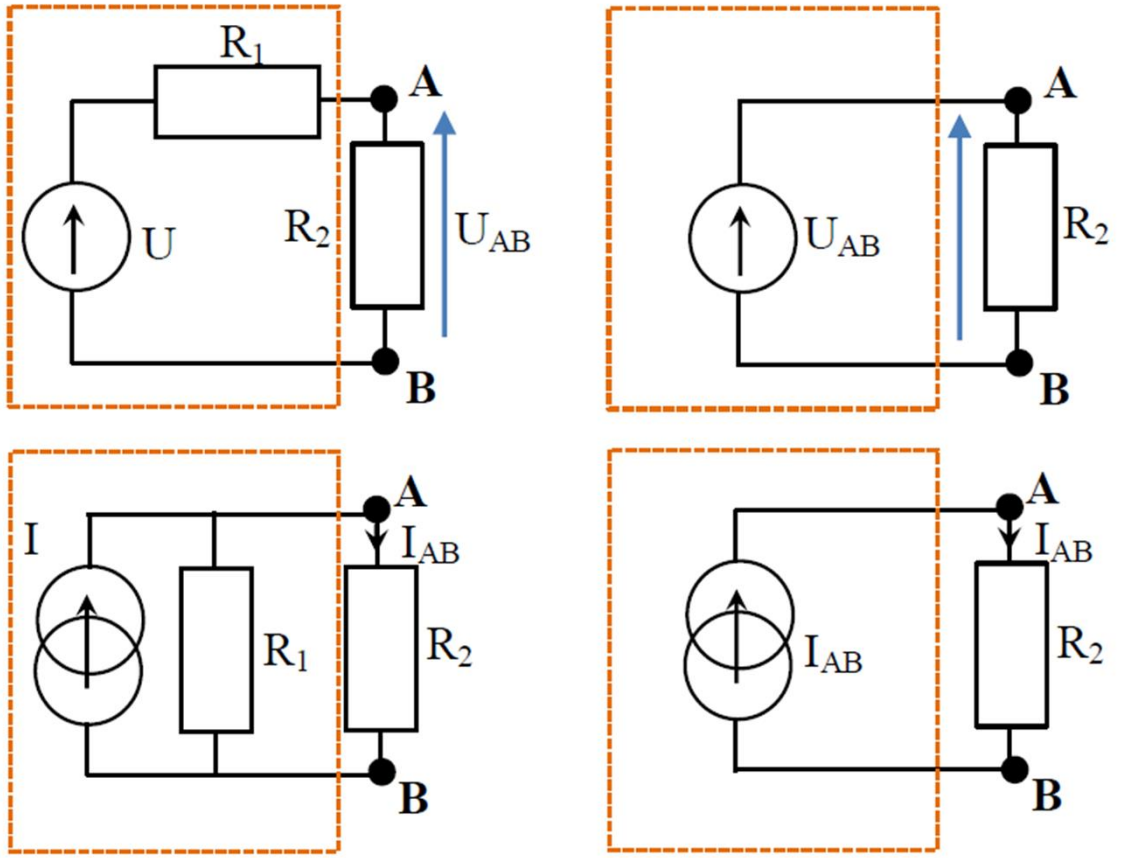


FIGURE : Exemples d'application du théorème de substitution en utilisant le pont diviseur de tension et le pont diviseur de courant.

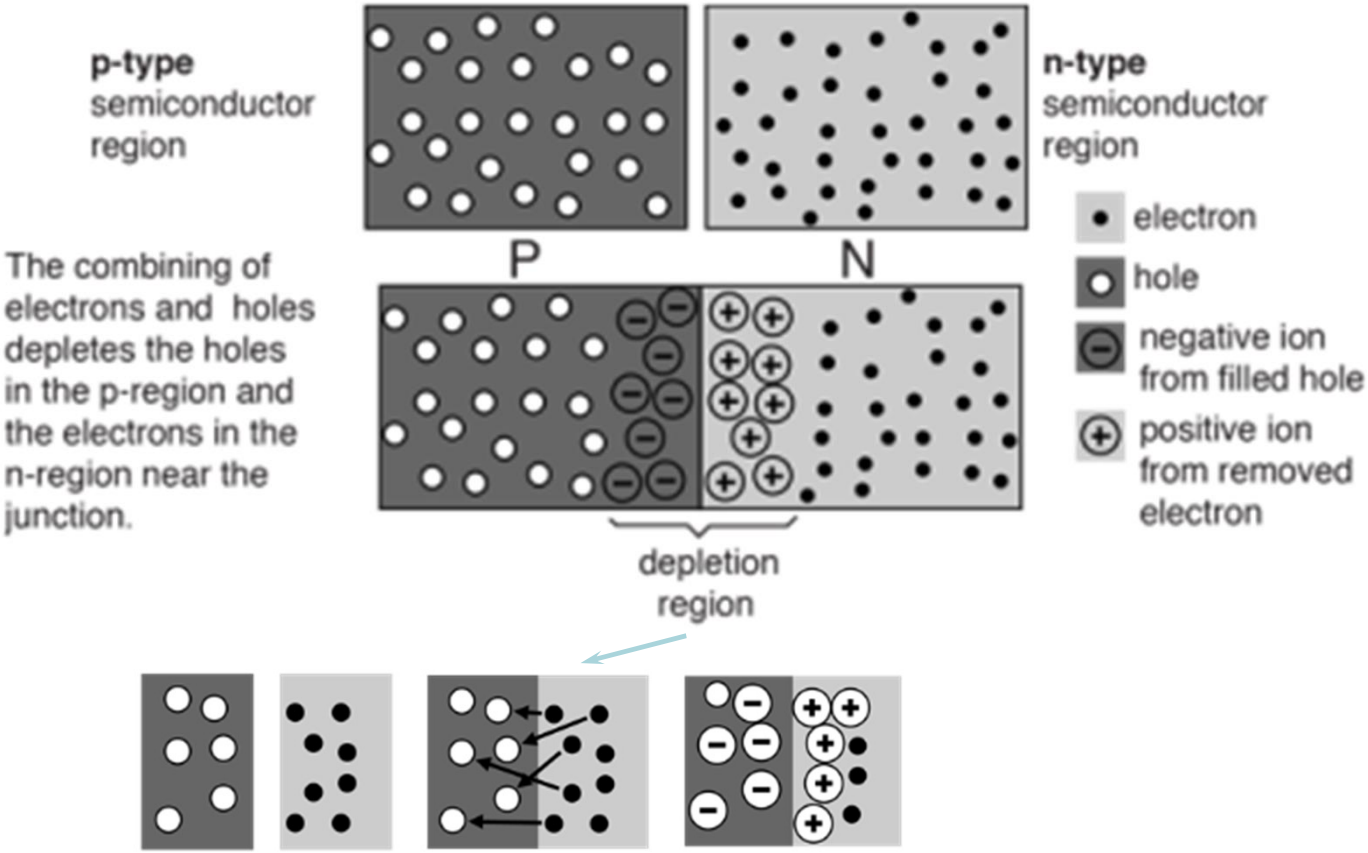
CHAPITRE 03

Jonction PN et Diodes

❑Jonction PN

Création de la jonction entre une région dopée N et une région dopée P

- ➢ Diffusion des porteurs majoritaires (électrons ↔ trous)
- ➢ Apparition de la région de charge d'espace ou zone de déplétion
- ➢ Établissement du champ électrique interne et de la barrière de potentiel



Le champ électrique interne induit une barrière de potentiel Vb.

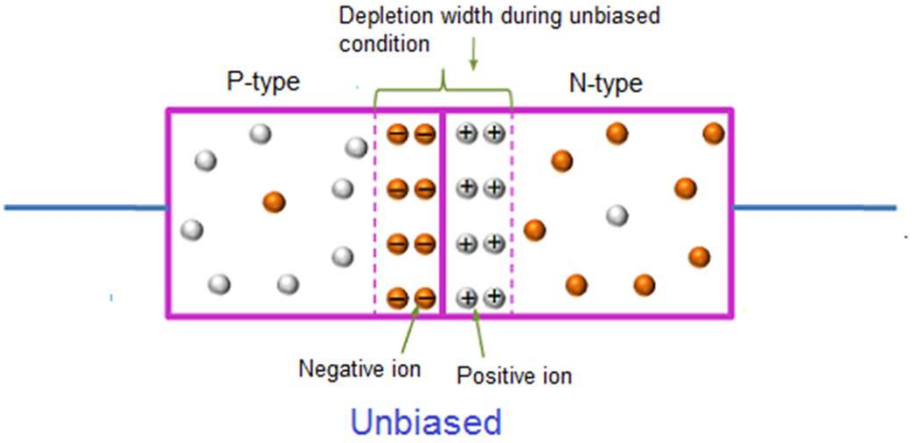
Cette barrière empêche les porteurs majoritaires de continuer à diffuser librement.

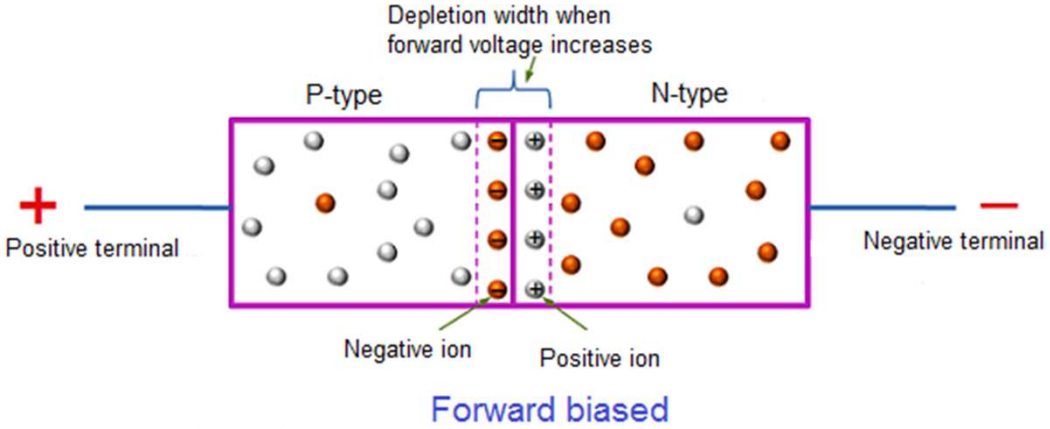
Typiquement pour le silicium, cette barrière vaut environ 0,6 à 0,7 V.

❑Comportement sous polarisation

AVANT Polarisation

- Il n'y a pas de courant net à travers la jonction.
- La barrière de potentiel empêche la circulation libre des porteurs majoritaires.
- La zone de déplétion agit comme une barrière naturelle.





Polarisation directe

- Réduction de la barrière de potentiel
- Injections de porteurs minoritaires
- Augmentation du courant

Polarisation inverse

- La zone de déplétion s'élargit,
- Les porteurs majoritaires ne peuvent plus franchir la jonction.
- Seuls quelques porteurs minoritaires (générés thermiquement) traversent la jonction.
- Un faible courant inverse circule, appelé courant de saturation inverse (Is).

❑ **DIODE à jonction PN (di** - deux; **ode** - chemin**),**

Une diode est un composant électronique non linéaire à deux bornes (anode et cathode) qui permet au courant de circuler dans un seul sens (de l'anode vers la cathode) et bloque le courant dans le sens opposé

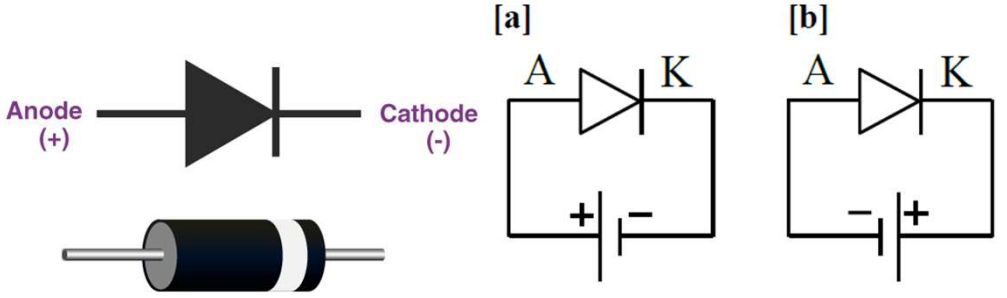


FIGURE : Polarisation de la diode, (a) en directe et (b) en inverse.

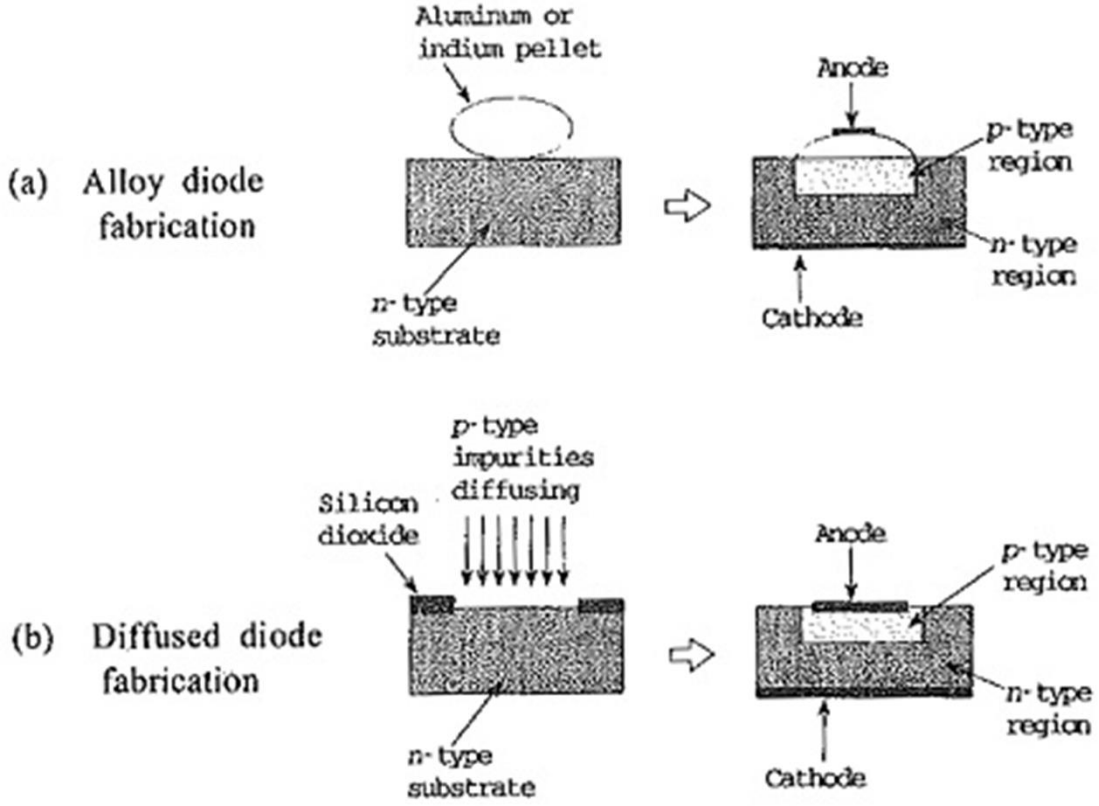
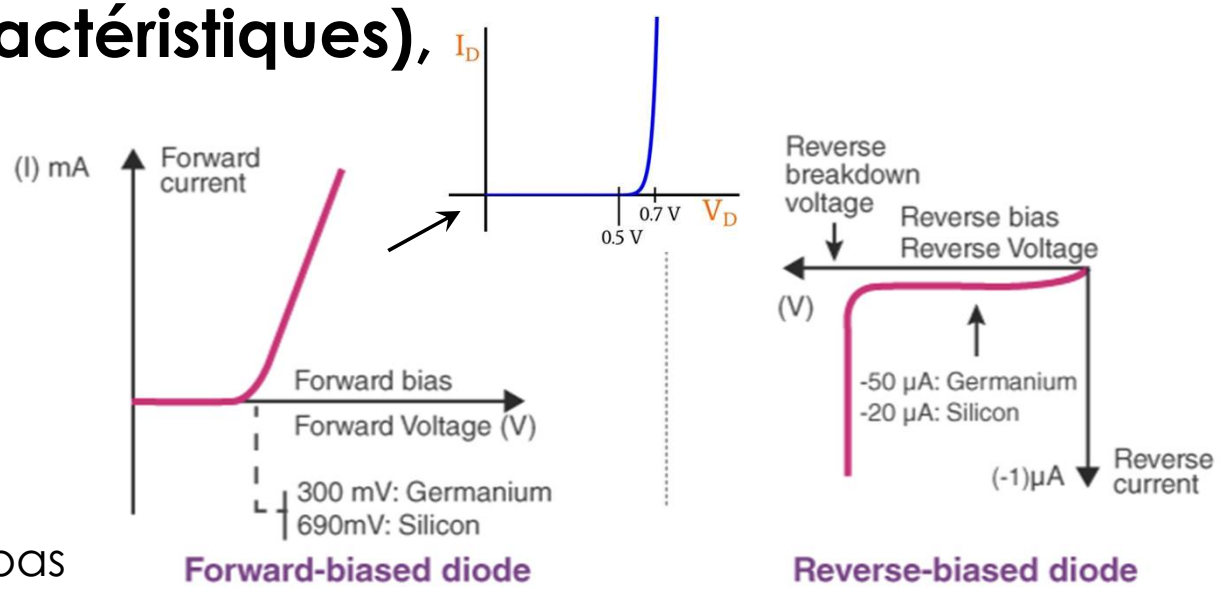


Figure 7-5
Diode fabrication methods. For the alloy diode, a pellet containing p-type impurities is melted into n-type material. A diffused diode is created by heating a wafer of n-type material in an atmosphere containing p-type impurities.

❑ DIODE à jonction PN (Caractéristiques),

L'équation de la diode de Shockley, qui décrit la relation courant–tension d'une diode

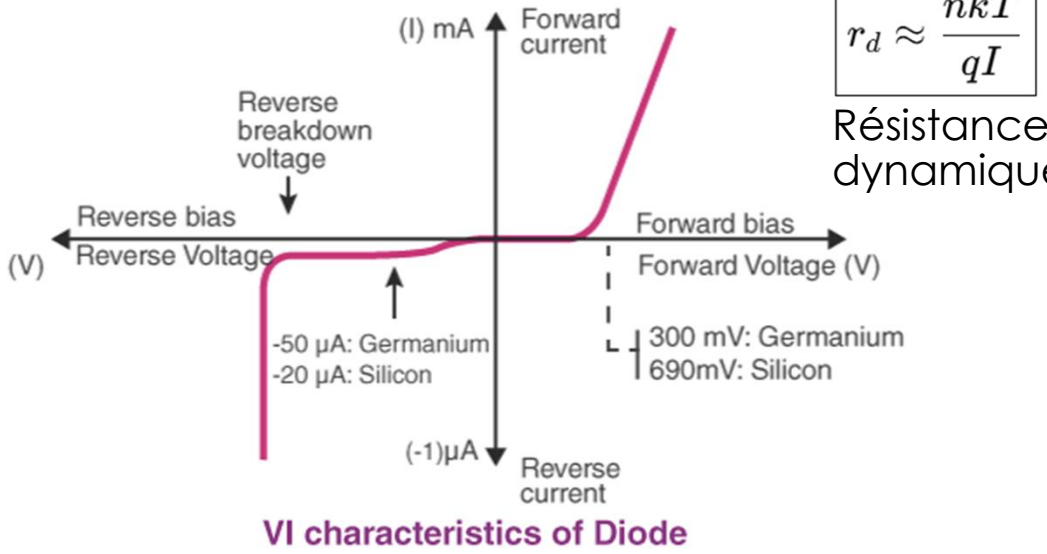
$$I = I_S\left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1\right)$$



✓ Quand V**=0** : le courant est nul, il n'y a pas de conduction nette.

✓ Quand V**>0** (polarisation directe): le terme exponentiel devient dominant et la diode laisse passer un courant important.

✓ Quand V**<0** (polarisation inverse) : le courant reste très faible (égal à $-I_S$), sauf en cas d'avalanche si la tension inverse dépasse la tension de claquage.



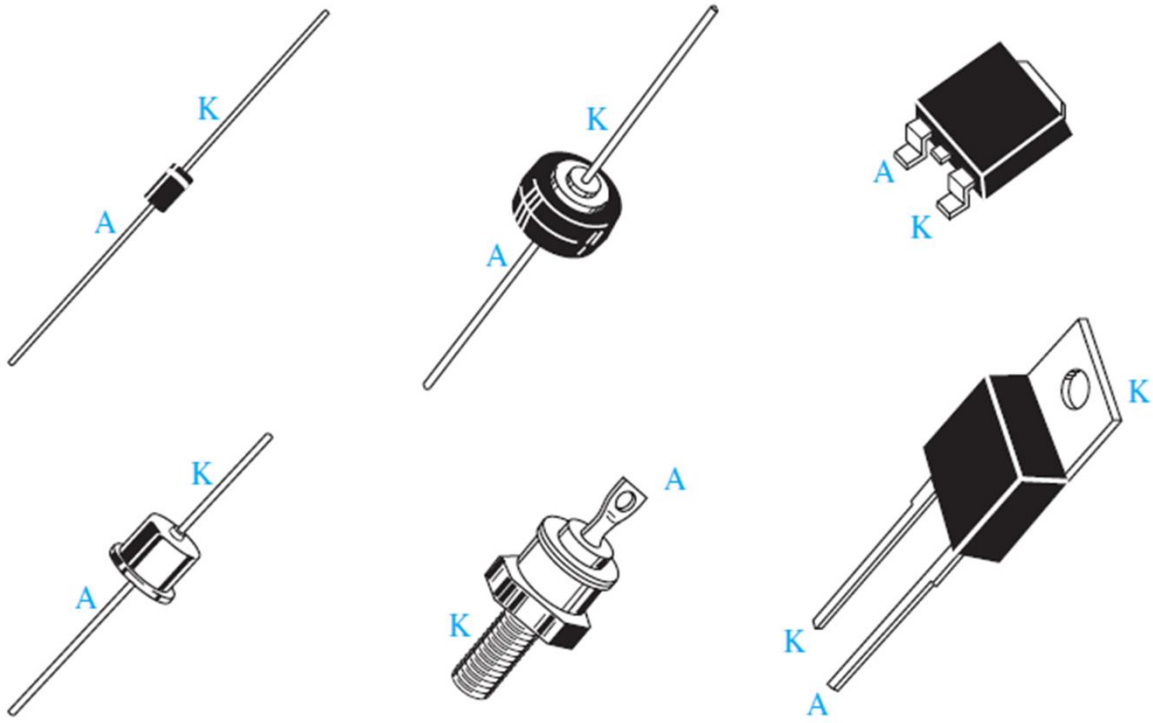
$$r_d \approx \frac{nkT}{qI}$$

Résistance dynamique

❑ DIODE à jonction PN (APPLICATION),

Applications courantes de la diode

- ➢Redressement : convertir un courant alternatif (AC) en courant continu (DC).
- ➢Protection contre les inversions de polarité.
- ➢Régulation de tension (diode Zener).
- ➢Éclairage/signalisation (LED).
- ➢Conversion photovoltaïque (photodiode / cellule solaire).

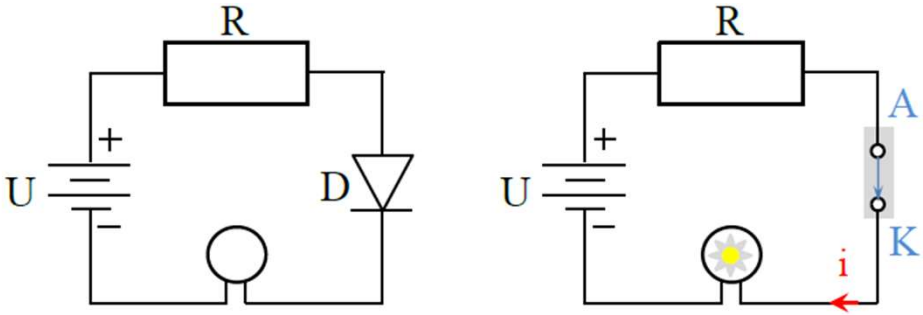


❑ DIODE à jonction PN (Analyse du circuit équivalent)

On peut dire que le modèle équivalent simplifié sera le plus souvent utilisé dans l'analyse des systèmes électroniques et d'alimentation.

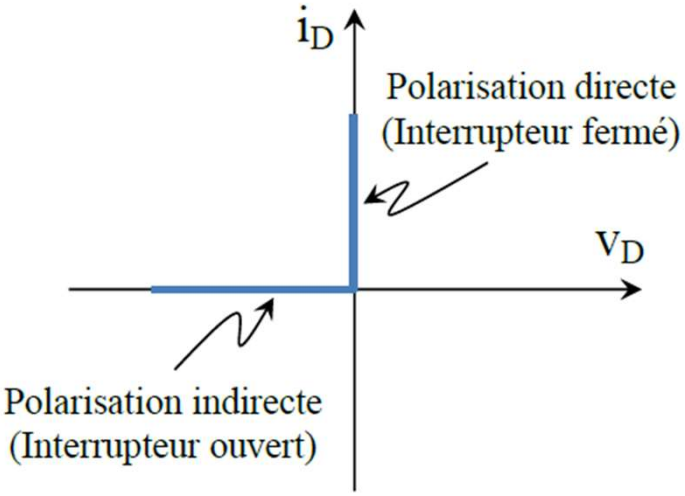
➢ Diode idéale (modèle idéal)

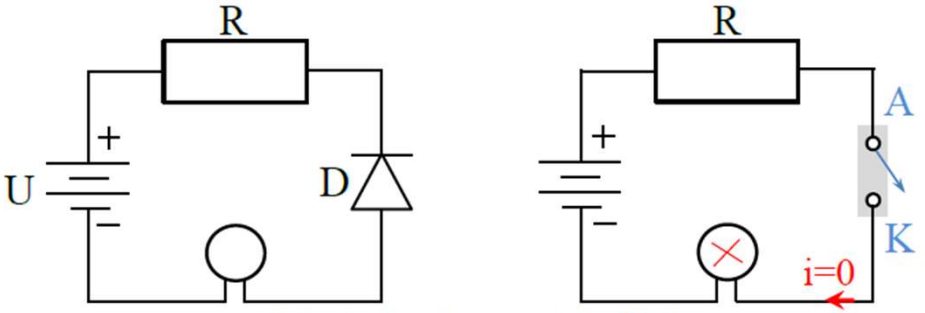
la diode est considérée idéale, c'est-à-dire qu'elle n'a aucune chute de tension lorsqu'elle conduit et aucun courant lorsqu'elle est bloquée.



Polarisation directe de la diode

$V_D = 0V$





Polarisation inverse de la diode

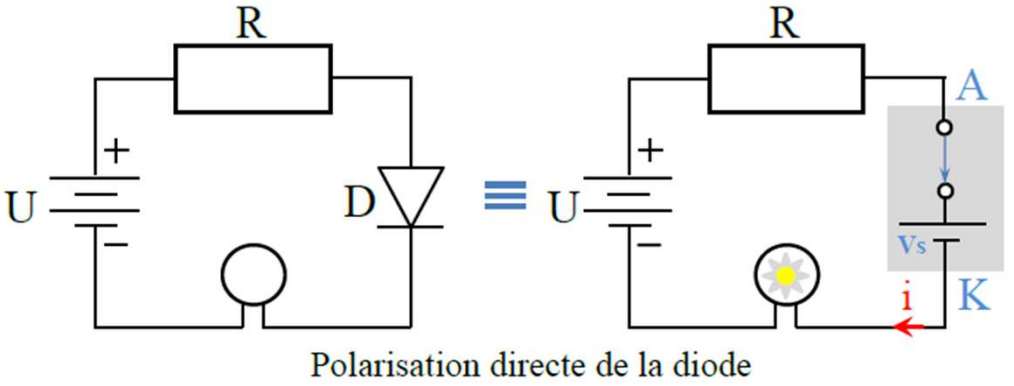
$I_D = 0A$

$$I(V) = \begin{cases} \text{Courant limité par le circuit}, & V > 0 \\ 0, & V < 0 \end{cases}$$

❑ DIODE à jonction PN (Analyse du circuit équivalent)

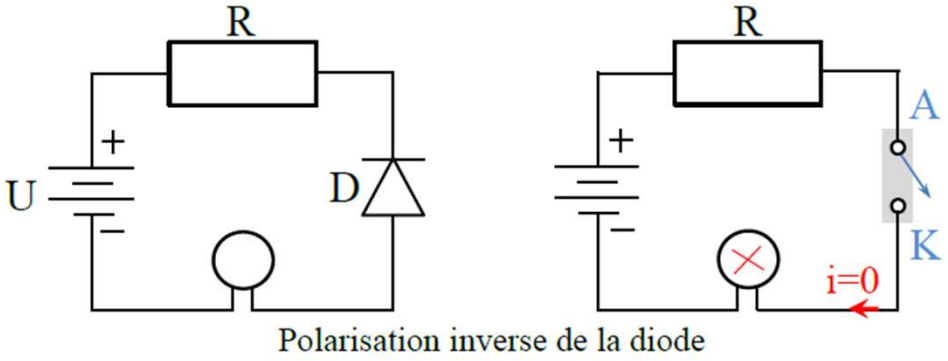
➢ Diode parfaite (modèle parfait)

la diode polarisée en direct est représentée comme un interrupteur fermé en série avec une petite source de tension égale au potentiel de barrière Vs (0,7 V pour Si, et 0.3V pour le Ge),



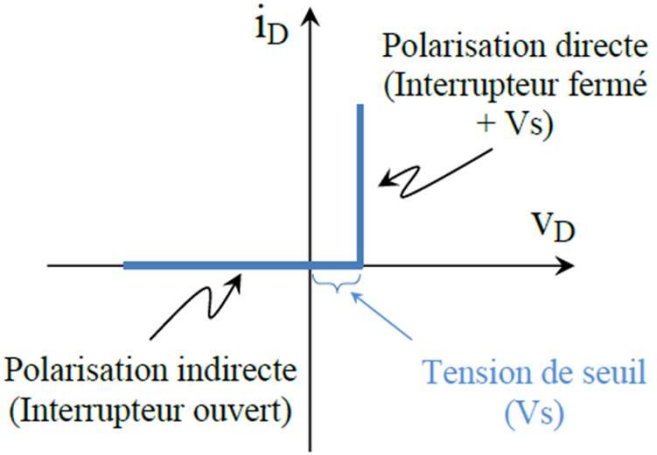
Polarisation directe de la diode

$V_D = Vs$



Polarisation inverse de la diode

$I_D = 0A$

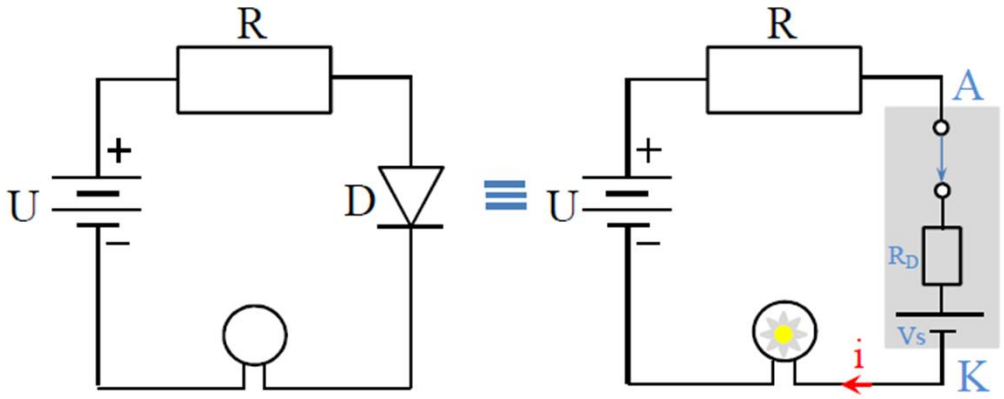


❑ DIODE à jonction PN (Analyse du circuit équivalent)

➢ Diode semi-réelle (modèle semi-réel)

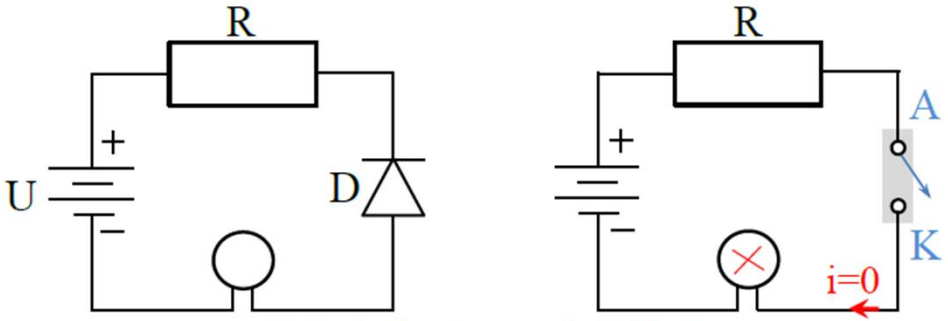
modèle semi-réel simple comprend une tension de seuil Vs et une résistance série Rs. Ce model fournira une excellente approximation du comportement réel de la diode.

Ce modèle n'inclut pas l'exponentielle du courant



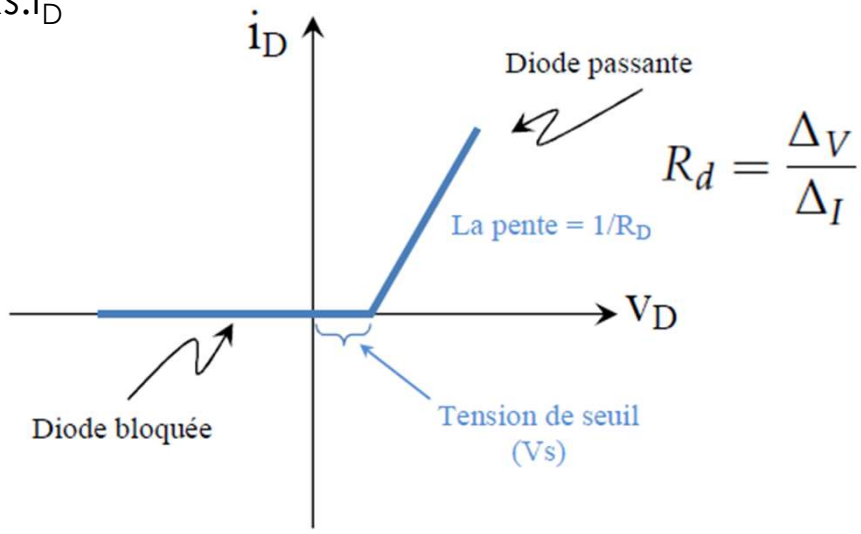
Polarisation directe de la diode

$V_D = Vs + Rs.I_D$



Polarisation inverse de la diode

$I_D = 0A$



❑ DIODE à jonction PN VS Cellule Solaire

Caractéristiques	Diode PN	Cellule solaire PN
Fonction principale	Conduction du courant dans un seul sens (redressement, protection).	Conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique (effet photovoltaïque).
Source d'énergie	Tension électrique externe.	Lumière solaire (photons).
Rôle de la jonction PN	Contrôler le passage du courant selon la polarisation.	Séparer les paires électron–trou générées par la lumière.
Position de la jonction	En profondeur dans le semi-conducteur, protégée de l'extérieur.	Proche de la surface pour permettre l'absorption des photons.
Courant produit	Dépend uniquement de la tension appliquée.	Généré par la lumière + dépendance à la tension.
Caractéristique I–V	$I = I_S\left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1\right)$	$I = I_L - I_S\left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1\right)$
Polarisation	Directe → conduction ; Inverse → blocage.	Pas besoin de polarisation externe → fonctionne grâce à l'éclairement.
Structure	Simple (jonction PN + boîtier).	Jonction PN optimisée

❑ DIODE à jonction PN (Applications pratiques)

➢ Circuit limiteur ou Clipping

Les circuits limiteurs ou écrêteurs (clipping circuits en anglais) sont des circuits à diodes conçus pour limiter la tension de sortie à une certaine valeur maximale (ou minimale)

Leur rôle principal est d'éliminer une partie du signal d'entrée qui dépasse une valeur seuil, sans modifier le reste du signal

1. Écrêteur positif

Le but est de couper ou limiter les parties positives d'un signal au-delà d'un certain seuil, appelé tension d'écrêtage.

Diode passante → $V_s = V_D$

Diode bloquée → $V_s = \frac{R_L}{R + R_L} Ve$

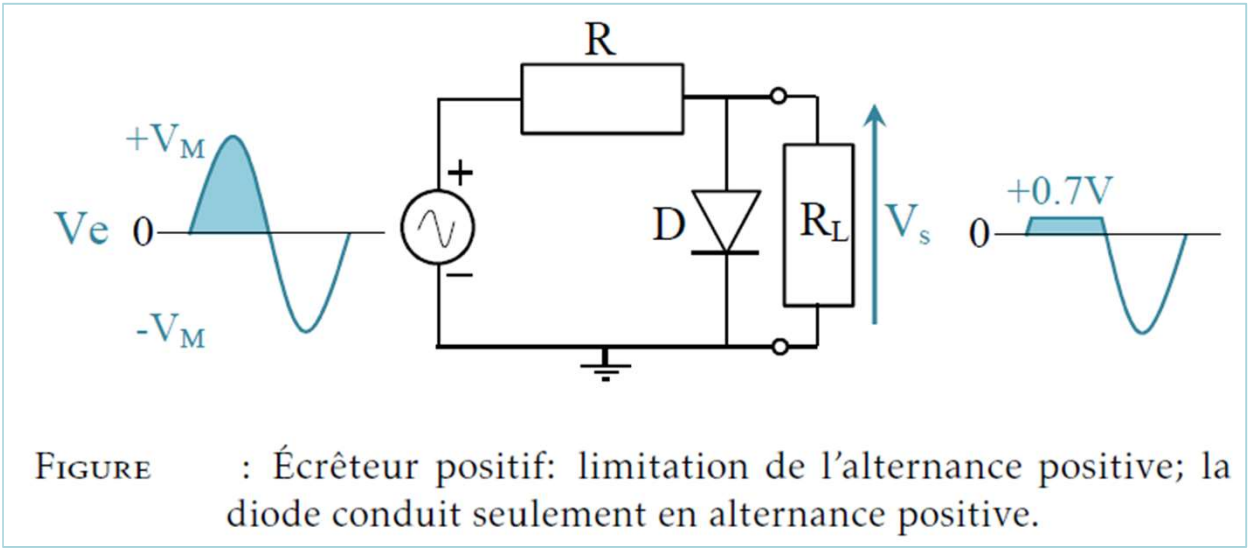


FIGURE : Écrêteur positif: limitation de l'alternance positive; la diode conduit seulement en alternance positive.

➢ Applications typiques

- ✓ Protection des étages d'entrée des amplificateurs.
- ✓ Limitation des pics de tension
- ✓ Traitement et mise en forme de signaux.

❑ DIODE à jonction PN (Applications pratiques)

2. Écrêteur négatif

Un écrêteur négatif (ou limiteur négatif) est un circuit conçu pour limiter la tension de sortie dans la partie négative d'un signal alternatif

Diode passante → $V_s = -V_D$

Diode bloquée → $V_s = \frac{R_L}{R + R_L} Ve$

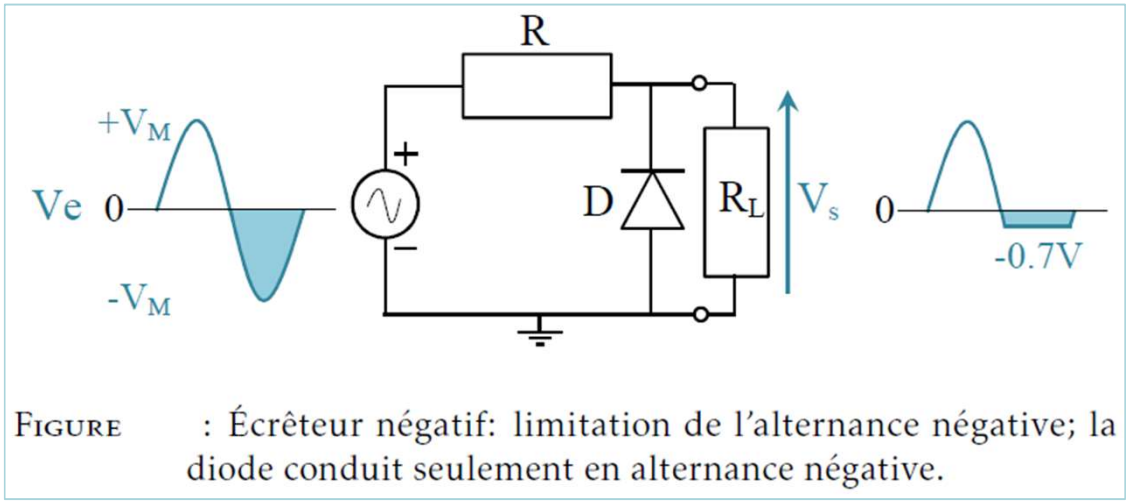


FIGURE : Écrêteur négatif: limitation de l'alternance négative; la diode conduit seulement en alternance négative.

➢ **Applications typiques**

✓ Limiter l'amplitude maximale du signal à une valeur précise,

✓ Supprimer les pics parasites,

✓ Maintenir une forme de signal stable pour un traitement plus fiable.

❑ DIODE à jonction PN (Applications pratiques)

3. Écrêteur double (positif + négatif)

Un écrêteur négatif (ou limiteur négatif) est un circuit conçu pour limiter la tension de sortie dans la partie négative d'un signal alternatif

Diode D1 passante/ D2 bloquée → $V_s = V_{D1}$

Diode D2 passante / D1 bloquée → $V_s = -V_{D2}$

Diodes bloquées → $V_s = \frac{R_L}{R + R_L} Ve$

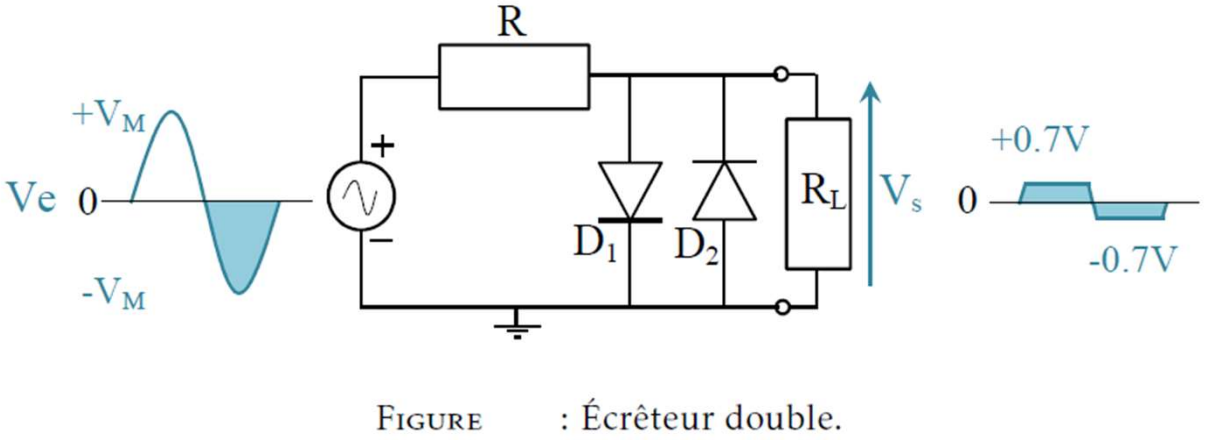


FIGURE : Écrêteur double.

➢ **Applications typiques**

✓ Génération d'ondes carrées ou limitées à partir d'un sinus.

✓ Protection des circuits logiques contre les surtensions.

✓ Réduction du bruit impulsionnel dans les transmissions.

❑ DIODE à jonction PN (Applications pratiques)

4. Écrêteur double avec niveau de limitation réglé

Un écrêteur double à niveau réglable (ou double limiter) est un circuit qui limite les amplitudes positives et négatives d'un signal à deux niveaux symétriques ou asymétriques

Diode D1 passante → $V_s = V_{BB1} + V_{D1}$

Diode D2 passante → $V_s = -V_{BB2} - V_{D2}$

Diodes bloquées → $V_s = \frac{R_L}{R + R_L} Ve$

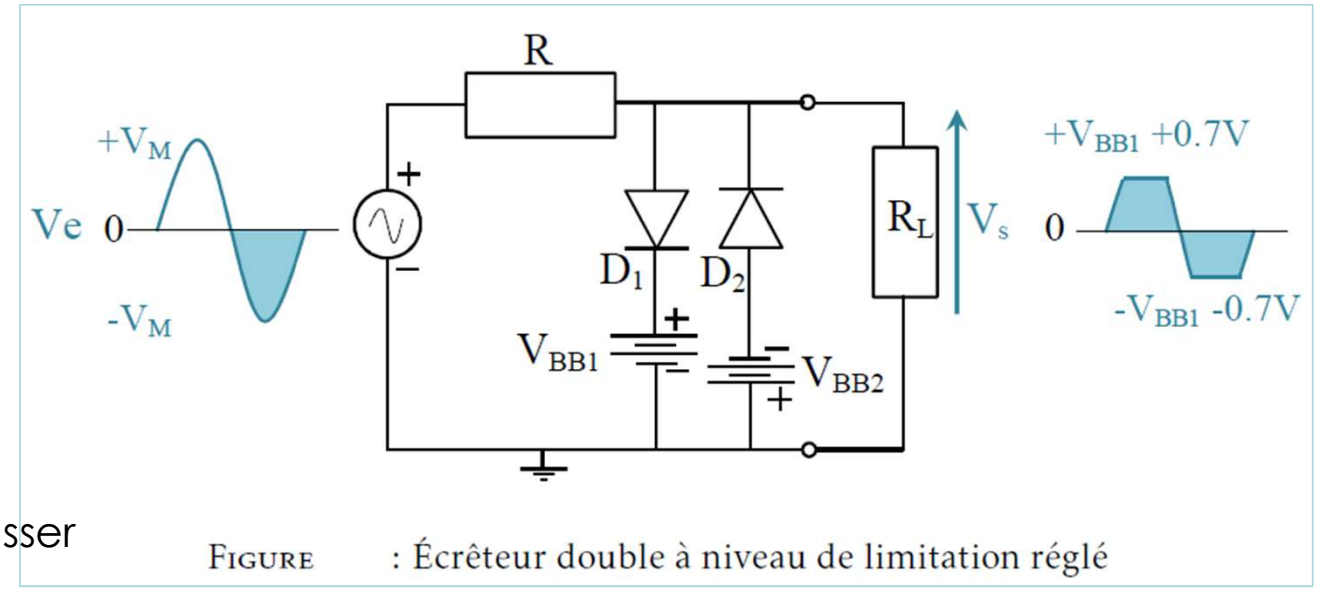


FIGURE : Écrêteur double à niveau de limitation réglé

➢ **Applications typiques**

✓ Réduction du bruit impulsionnel

✓ Eviter les surtensions destructrices

✓ Empêche les signaux sonores de dépasser une certaine amplitude

❑ DIODE à jonction PN (Applications pratiques)

Circuits redresseurs

Les redresseurs sont des circuits qui convertissent un signal d'entrée alternatif (comprenant les deux signes) en un signal de sortie unidirectionnel (un signe unique).

5. Redresseur mono-alternance

Le redresseur mono-alternance ou demi-onde est un circuit qui fournit une tension de sortie demi-sinusoïdale positive (ou négative) pour une tension d'entrée sinusoïdale pure.

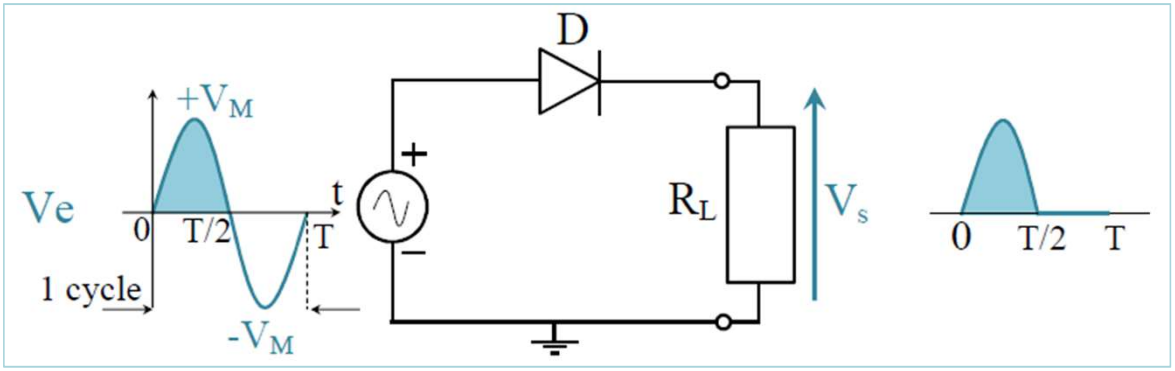
$$\begin{cases} Vs = V_M sin\omega t - V_{seuil}, & 0 \le t \le \dfrac{T}{2} \\ Vs = 0, & \dfrac{T}{2} \le t \le T. \end{cases}$$

$$Vs_{moy} = \frac{1}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} (V_M sin\omega t - V_{seuil})dt = \frac{V_M}{\pi} - \frac{V_{seuil}}{2}$$

$$Vs_{eff} = \left(\frac{1}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} (V_M sin\omega t - V_{seuil})dt\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$= \left(\frac{V_M^2}{4} - \frac{2V_M V_{seuil}}{2\pi} + \frac{V_{seuil}^2}{2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

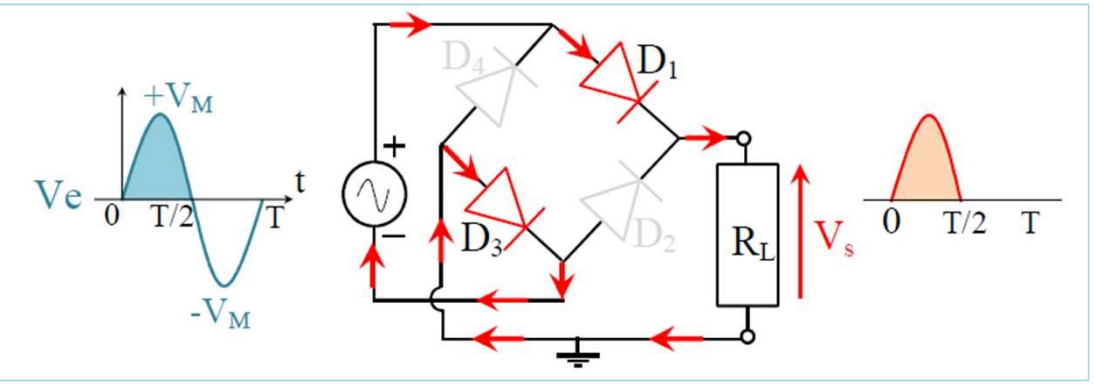
$$= \frac{V_M}{2} \qquad si \quad V_{seuil} \ll V_M$$

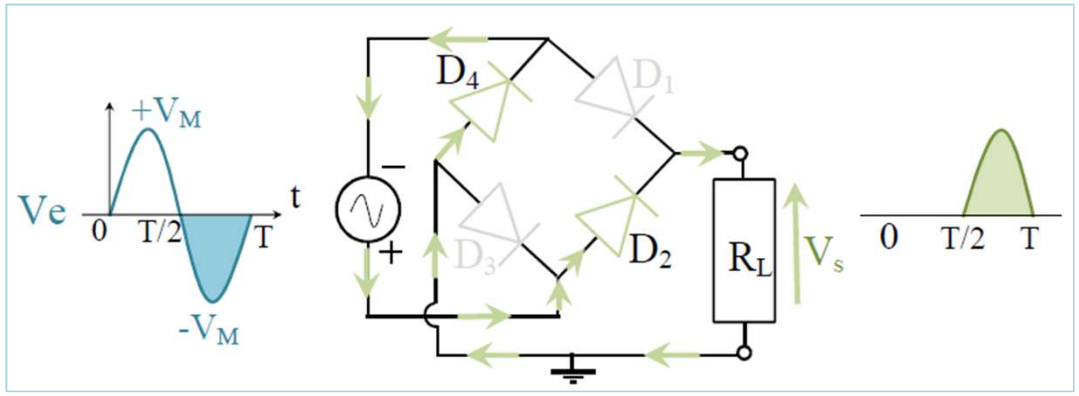


❑ DIODE à jonction PN (Applications pratiques)

6. Redresseurs double-alternances avec pont de diodes.

C'est un circuit qui permet un courant unidirectionnel à la charge pendant tout le cycle d'entrée (alternance positive + négative),

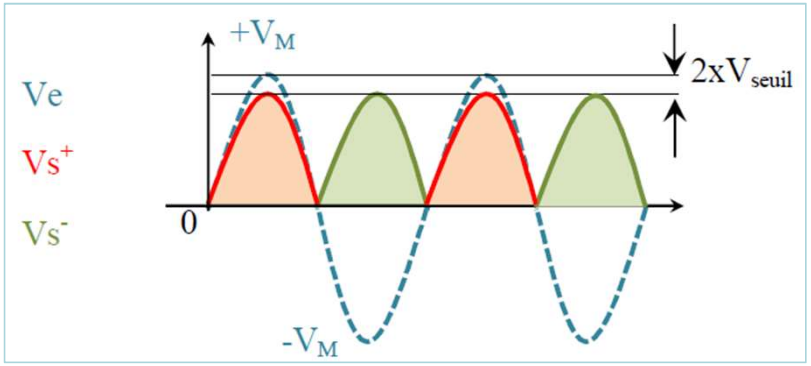




$$\begin{cases} Vs = V_M sin\omega t - (V_{D1seuil} + V_{D3seuil}), & 0 \le t \le \dfrac{T}{2} \\ Vs = -V_M sin\omega t - (V_{D2seuil} + V_{D4seuil}), & \dfrac{T}{2} \le t \le T. \end{cases}$$

$$Vs_{moy} = \frac{1}{T}\int_0^T V_M sin\omega t dt = \frac{2V_M}{\pi}$$

$$Vs_{eff} = \left(\frac{1}{T}\int_0^T (V_M sin\omega t)^2 dt\right)^{\frac{1}{2}} = \frac{V_M}{\sqrt{2}}$$



❑ DIODE à jonction PN (Applications pratiques)

Résumé

Sinusoidale non redressé

$$V_{\text{moy}} = \frac{1}{T}\int_0^T V_m \sin(\omega t)\,dt = 0,$$

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T \left(V_m \sin \omega t\right)^2 dt} = V_m\sqrt{\frac{1}{2}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}.$$

Double redressement

$$V_{\text{moy}} = \frac{1}{T}\int_0^T |V_m \sin \omega t|\,dt = \frac{2V_m}{\pi} \approx 0{,}637\,V_m$$

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T \left(|V_m \sin \omega t|\right)^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T V_m^2 \sin^2 \omega t\,dt} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}.$$

Mono redressement

$$V_{\text{moy}} = \frac{1}{T}\int_0^T v(t)\,dt = \frac{1}{T}\int_0^{T/2} V_m \sin(\omega t)\,dt$$

$$V_{\text{moy}} = \frac{2V_m}{T\omega} = \frac{V_m}{\pi} \approx 0{,}318\,V_m$$

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T v^2(t)\,dt} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^{T/2} V_m^2 \sin^2(\omega t)\,dt}$$

$$= V_m\sqrt{\frac{1}{2\pi}\cdot\frac{\pi}{2}} = \frac{V_m}{2}$$

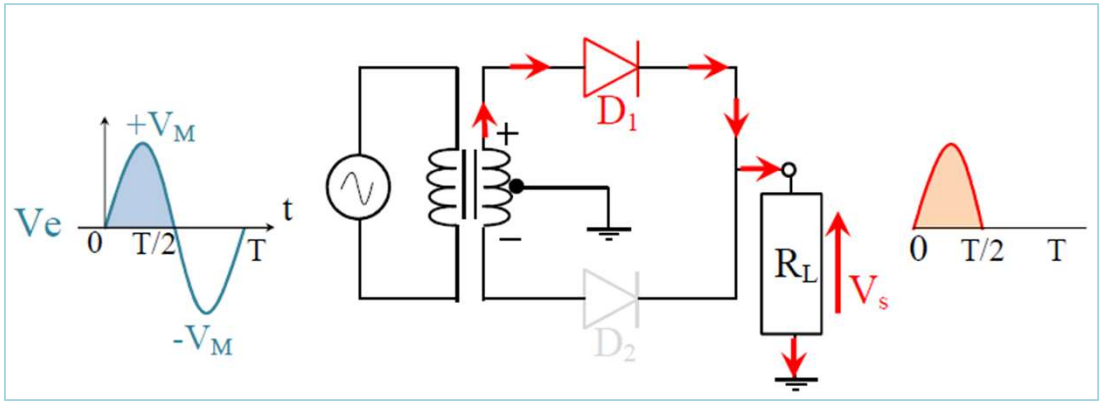
$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

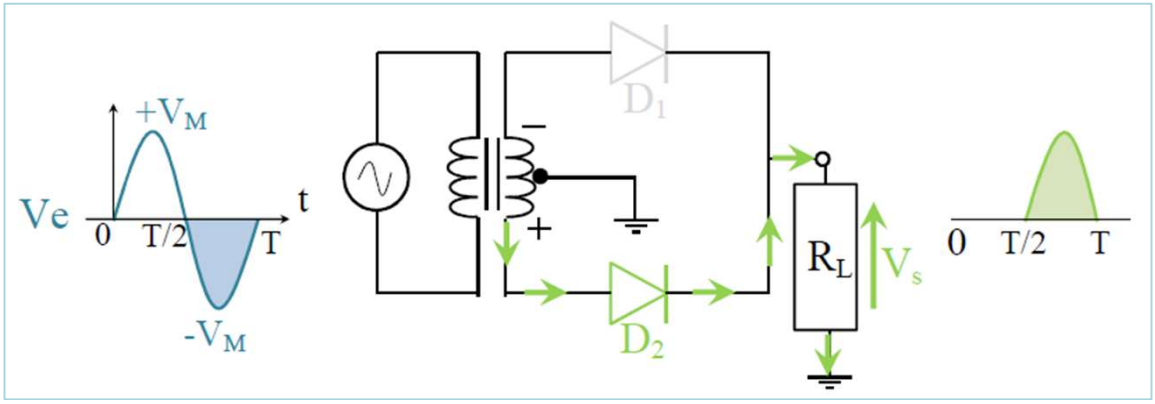
Type de signal	V_{moy}	V_{rms}
Sinusoïde non redressée	0	$\frac{V_m}{\sqrt{2}} \approx 0.707\ V_m$
Redressée double alternance	$\frac{2V_m}{\pi} \approx 0.637\ V_m$	$\frac{V_m}{\sqrt{2}} \approx 0.707\ V_m$
Redressée monoalternance	$\frac{V_m}{\pi} \approx 0.318\ V_m$	$\frac{V_m}{2} = 0.5\ V_m$

❑ DIODE à jonction PN (Applications pratiques)

7. Redresseurs double-alternances avec transformateur a point au milieu

C'est un circuit redresseur double-alternances avec seulement deux diodes mais nécessitant un transformateur à point au milieu.





- **Tension de sortie redressée :**

$$v_s(t) = |V_{\max} \sin(\omega t)|$$

- **Valeur moyenne :**

$$V_{\text{moy}} = \frac{2V_{\max}}{\pi}$$

- **Valeur efficace :**

$$V_{\text{eff}} = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}}$$

- **Nombre de diodes en conduction :** une diode à la fois par alternance.
- **Fréquence de sortie :**

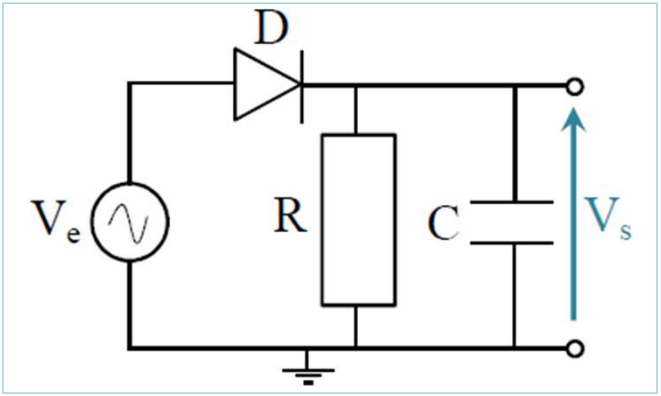
$$f_{\text{sortie}} = 2f_{\text{entrée}}$$

❑ DIODE à jonction PN (Applications pratiques)

8. Détecteur de crête

Un détecteur de crête (ou peak detector en anglais) est un circuit électronique qui capture et mémorise la valeur maximale (ou minimale) d'un signal d'entrée

$$V_s = Ve - V_D$$



Signal croissant → condensateur se charge → V_S suit la crête.

Signal décroissant → diode bloquée → V_S reste au maximum.

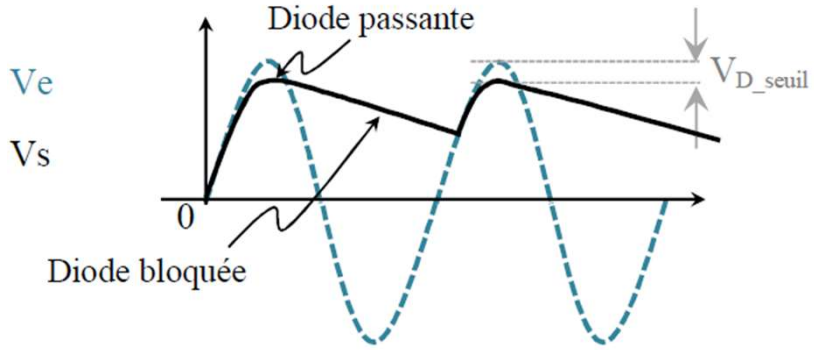
Avec résistance → V_S décroît lentement si le pic suivant est plus bas

Applications typiques

✓ mesurer des amplitudes,

✓ suivre des variations rapides,

✓ détecter des pics de tension,



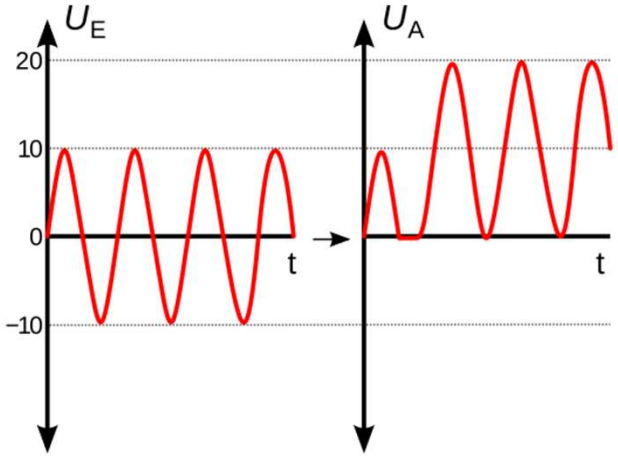
❑ DIODE à jonction PN (Applications pratiques)

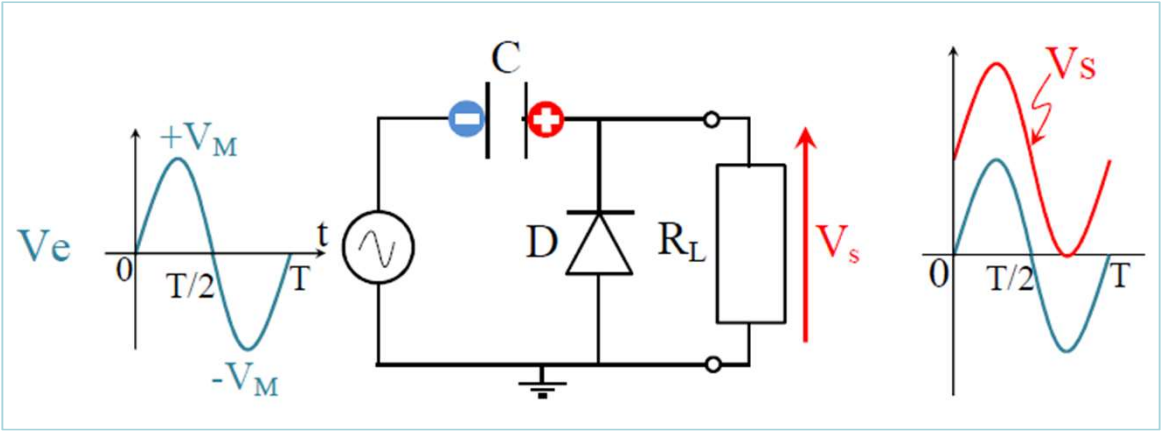
Circuits de restauration ou Clamping

C'est circuit utilisé pour déplacer un signal ondulatoire à un niveau différent (appelé décalage ou offset en anglais) sans changer son apparence.

9. Circuits de restauration positif

Un circuit électronique qui déplace tout un signal vers le haut afin que sa valeur minimale atteigne un niveau de référence positif, généralement 0V.

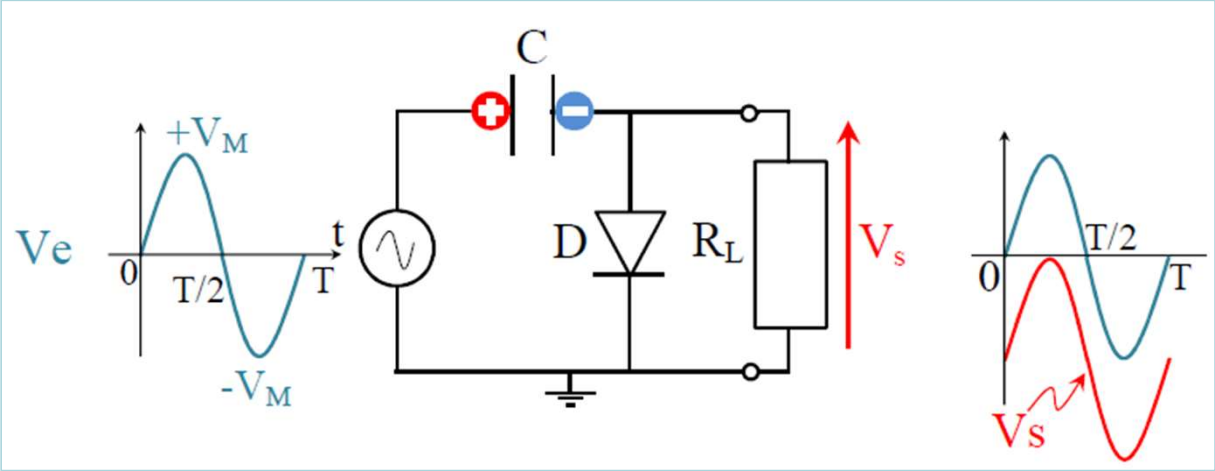




❑ DIODE à jonction PN (Applications pratiques)

10. Circuits de restauration négatif

est un circuit électronique qui translate tout le signal vers le bas, de façon à ce que la valeur maximale du signal atteigne un niveau négatif — généralement 0V



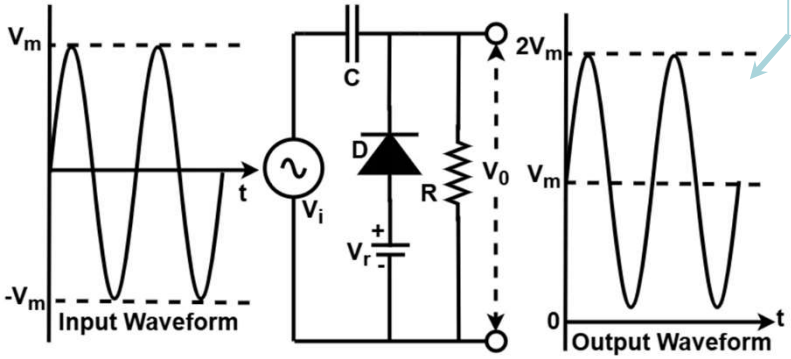
Applications typiques

- ✓ Prévenir surtensions et saturations
- ✓ Adapter les niveaux logiques et protéger les circuits
- ✓ Adapter le signal à la plage de mesure

❑ DIODE à jonction PN (Applications pratiques)

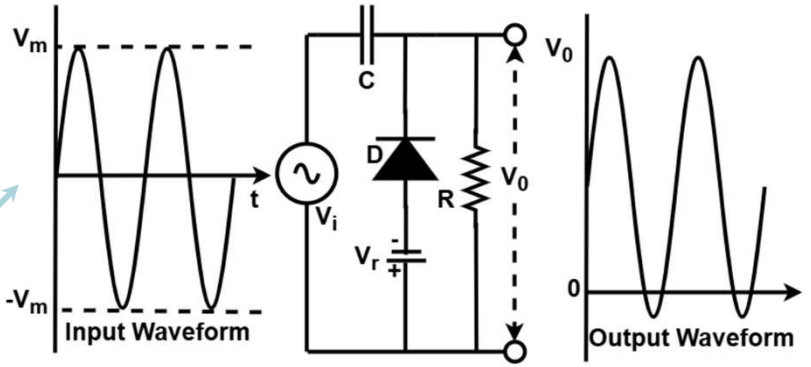
Circuits restauration avec tension de référence

C se charge à V_M+V_{ref}



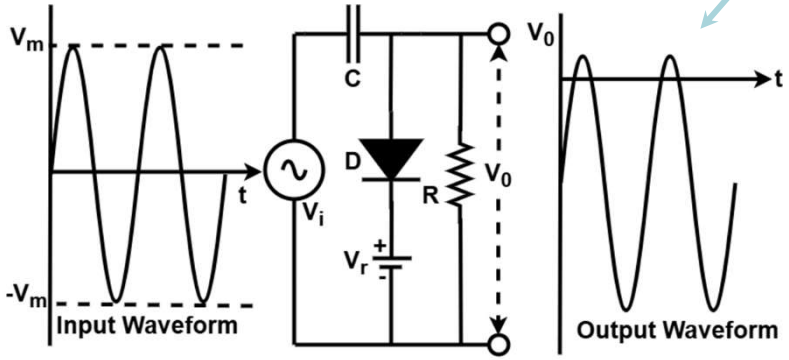
Positive Clamper with
Positive Refernce Voltage V_r

C se charge à V_M-V_{ref}



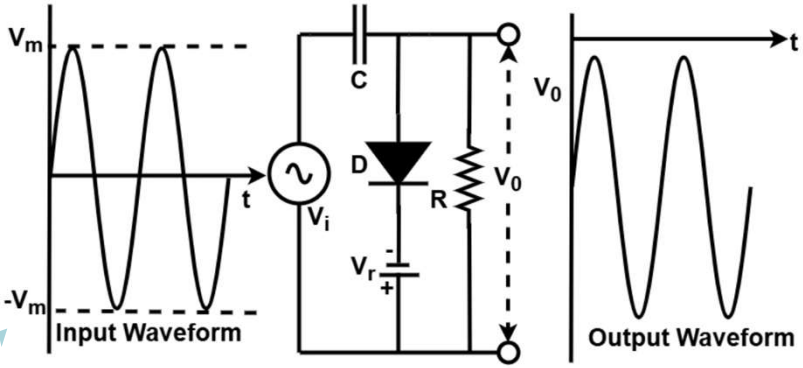
Positive Clamper with
Negative Refernce Voltage V_r

C se charge à V_M-V_{ref}



Negative Clamper Circuit With
Positive Reference Voltage

C se charge à V_M+V_{ref}



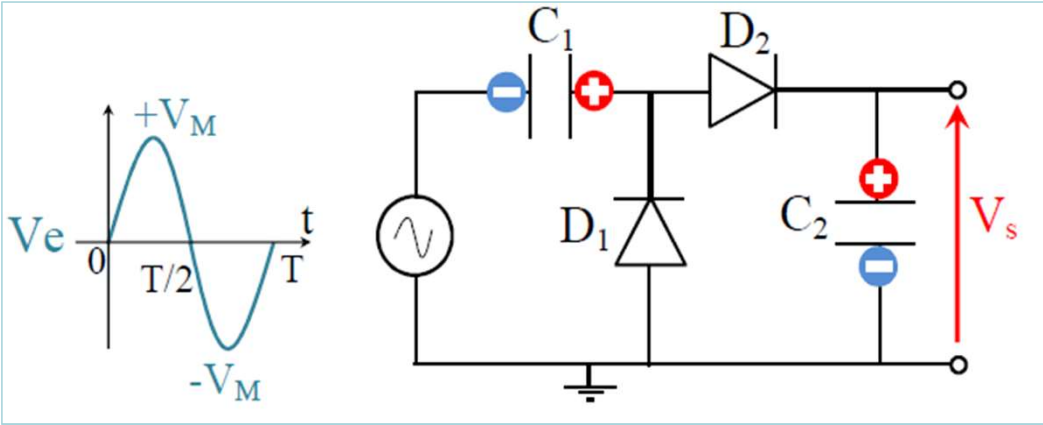
Negative Clamper with
Negative Reference Voltage

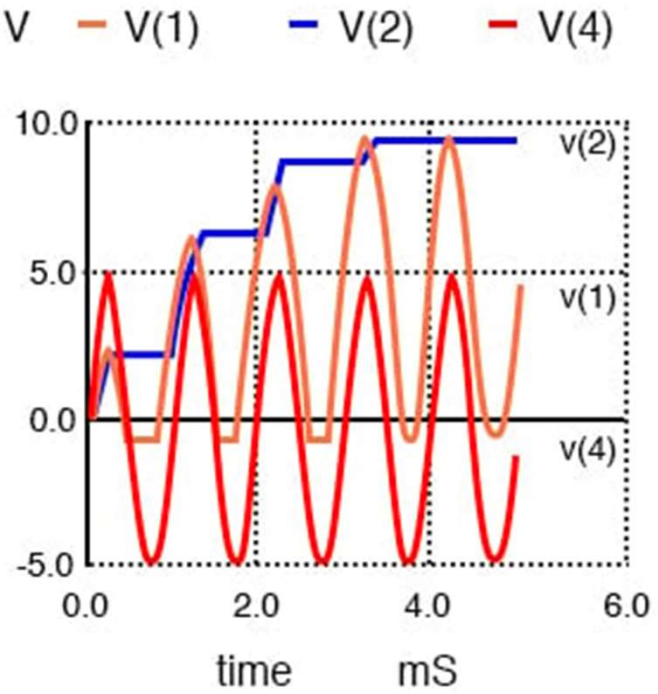
❑ DIODE à jonction PN (Applications pratiques)

Circuits multiplicateur de tension

Un multiplicateur de tension (voltage multiplier) est un circuit électronique qui permet d'augmenter une tension alternative (AC) en une tension continue (DC) plus élevée

12. Doubleur de tension





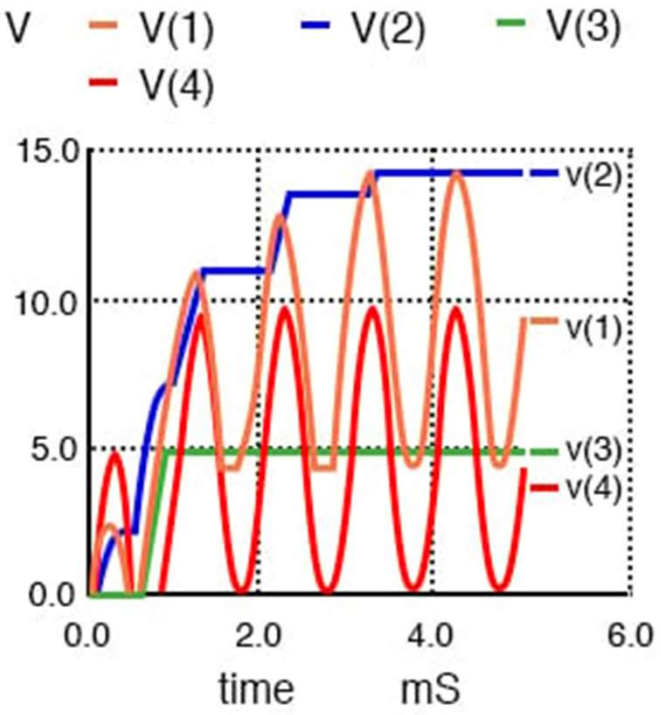
Applications typiques

- ✓ Génération de plusieurs kV pour tubes cathodiques (CRT), rayons X, lasers.
- ✓ Alimentations haute tension sans transformateur lourd.
- ✓ Conversion AC faible tension → DC haute tension.
- ✓ Génération de tension d'allumage (allumage au néon, lampes à décharge…)

❑ DIODE à jonction PN (Applications pratiques)

Circuits multiplicateur de tension

12. Tripleur de tension



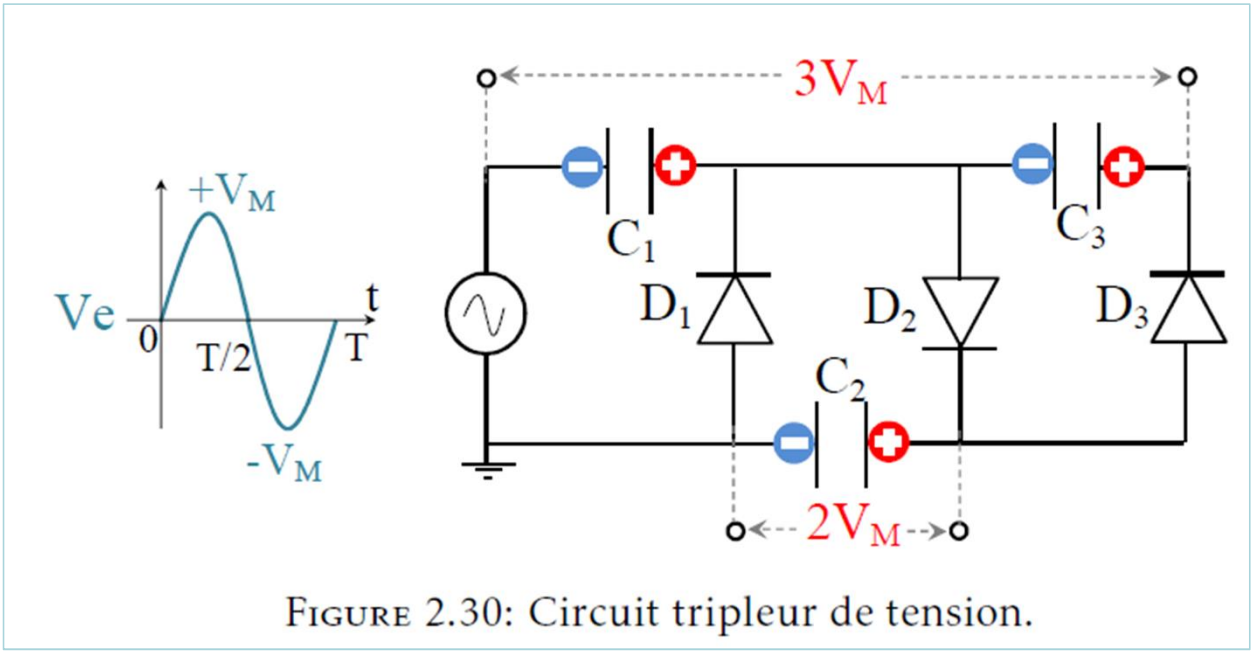


FIGURE 2.30: Circuit tripleur de tension.

$$\begin{cases} V_{C1} = V_M \\ V_{C2} = 2V_M \\ V_{C3} = V_{C2} = 2V_M \\ Vs = V_{C1} + V_{C3} = 3V_M \end{cases}$$

❑ DIODE à jonction PN (Applications pratiques)

13. Portes logiques à diodes

Une porte logique est un circuit qui donne un niveau "0" (bas) ou un niveau "1" (haut) à la sortie, en fonction des conditions d'entrées.

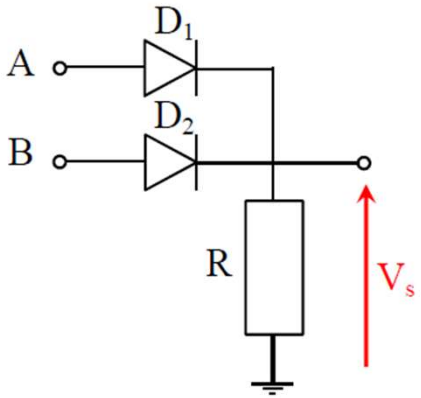


FIGURE : Circuit d'une porte logique OU.

$$\begin{cases} A=0, B=0, & D1=D2=OFF, & Vs=0V \\ A=5V, B=0, & D1=ON \quad et \quad D2=OFF, & Vs=5V \\ A=0, B=5V, & D1=OFF \quad et \quad D2=ON, & Vs=5V \\ A=5V, B=5V, & D1=ON \quad et \quad D2=ON, & Vs=5V \end{cases}$$

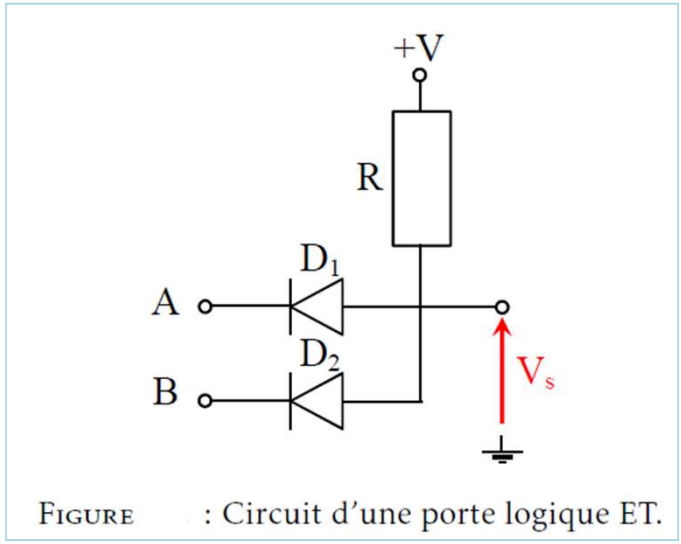
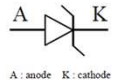


FIGURE : Circuit d'une porte logique ET.

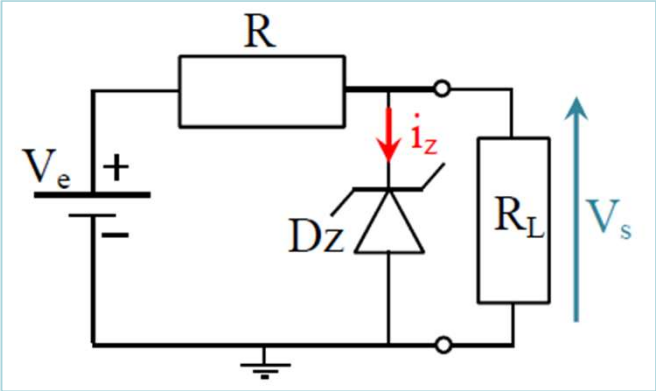
$$\begin{cases} A=0, B=0, & D1=D2=ON, & Vs=0V \\ A=5V, B=0, & D1=OFF \quad et \quad D2=ON, & Vs=0V \\ A=0, B=5V, & D1=ON \quad et \quad D2=OFF, & Vs=0V \\ A=5V, B=5V, & D1=OFF \quad et \quad D2=OFF, & Vs=5V \end{cases}$$

❑ DIODE Zener

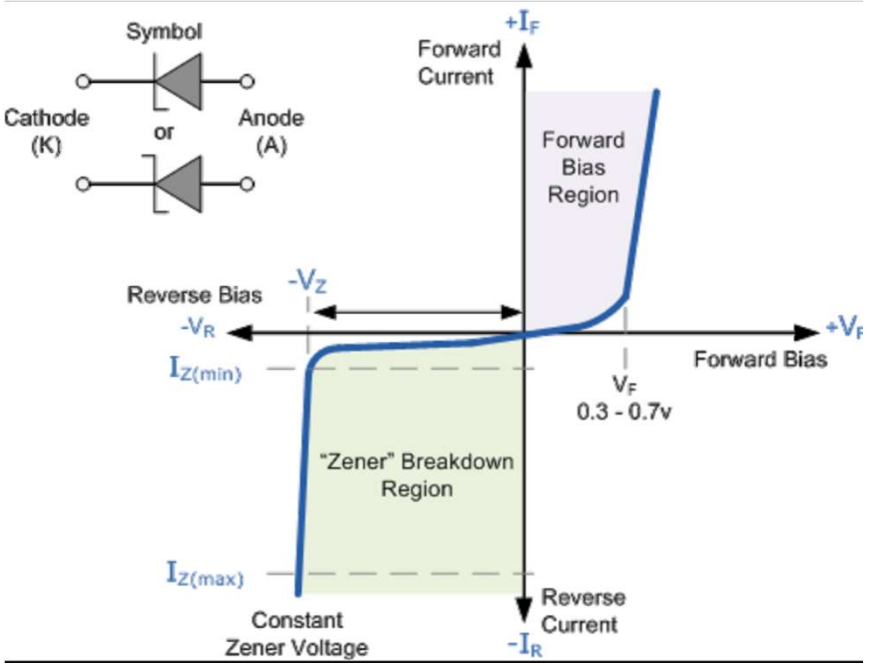


La diode **Zener** ou la diode de référence, est une diode à jonction p-n utilisée en polarisation inverse comme régulateur de tension.

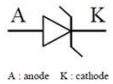
- En polarisation directe: se comporte comme une diode classique.
- En polarisation inverse: se bloque jusqu'à atteindre une tension spécifique appelée tension Zener V_Z.
- Une fois V_Z atteinte, elle entre en conduction inverse tout en maintenant une tension stable égale à VZ.



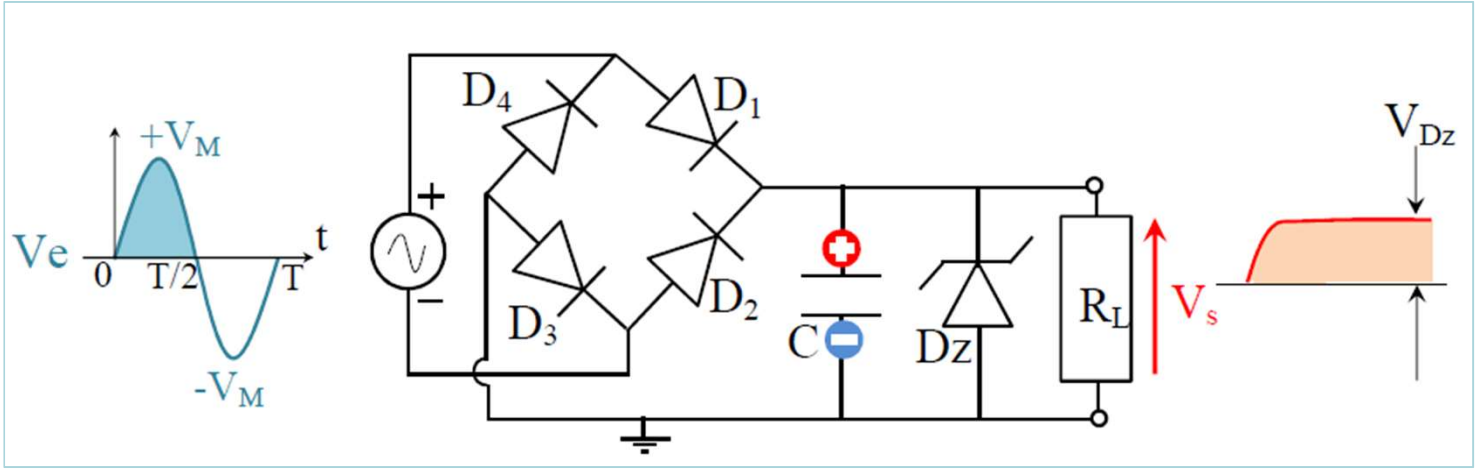
- Zener est polarisée en inverse
  - ✓ Si Ve ≥ Vz, la diode Zener est passante → V_s = V z
  - ✓ si Ve < Vz, la diode est bloquée → $V_s = \frac{R_L}{R + R_L} Ve$



❑ DIODE Zener



Circuit redresseur redresseur double alternances avec tension stabilisée à l'aide d'une diode Zener.



Double limiteur d'un signal sinusoïdale avec deux diodes Zener 5V1